KAS DOMINA FIZIKUS ŠIANDIEN ?

KAS DOMINA FIZIKUS ŠIANDIEN?

ATRADIMAI, PRIELAIDOS, FAKTAI

KAUNAS „ŠVIESA" 1996

UDK 53
Ka502

Autoriai: **Viktorija Gineitytė, Vitalijus Ginzburgas, Stivenas V. Hokingas, Romualdas Karazija, Arūnas Krotkus, Tatjana Nedveckaitė, Juozas Vidmantis Vaitkus, Bonifacas Vengalis**

Vertėjai: **Romualdas Karazija, Kęstutis Makariūnas**

Sudarė **Romualdas Karazija**

Lietuvos Respublikos švietimo ir mokslo ministerijos rekomenduota

ISBN 5-430-02093-1

TURINYS

PRATARMĖ

ELENOS JUŠKIENĖS,
DAUGELIO FIZIKOS KNYGŲ
RŪPESTINGOS REDAKTORĖS,
ŠVIESIAM ATMINIMUI

Matyt, visi vyresniosios kartos ir net jaunesni fizikos knygų skaitytojai yra vartę „Fizikos mokyklos" leidinių serijos knygeles. Jų iniciatorė ir organizatorė buvo „Mokslo" leidyklos fizikos ir matematikos literatūros redakcijos ilgametė vedėja E. Juškienė. Toje serijoje 1975 m. ir 1984 m. pasirodė dvi fizikos naujienų apžvalgos tuo pačiu pavadinimu „Kas domina fizikus šiandien?" Atsižvelgiant į fizikų priežodį, jog du faktai — tai dėsningumas, o trys — tradicija, 1993 m. buvo numatyta išleisti ir trečiąją knygelę. Deja, jau pradėjusi redaguoti rankraštį, mirė E. Juškienė. „Mokslo" leidykla nustojo leisti „Fizikos mokyklą"*. (Laimei, mokiniams reikalinga knygele pasirūpino „Šviesos" leidykla.)

Mokslo populiarinimo knygos beveik išnyko iš mūsų knygynų, užleisdamos vietą astrologijos, chiromantijos, parapsichologijos brošiūroms, anomalių reiškinių ir „skraidančiųjų lėkščių" aprašymams, kurių leidėjai, deja, dažniausiai rūpinasi ne mokslo žinių skleidimu (tas ilgą laiką draudžiamas temas irgi galima nagrinėti iš mokslo pozicijų), bet antro šviežumo sensacijomis, kurios vis dėlto garantuoja gana efektyvią pinigų telekinezę iš patiklių skaitytojų piniginių į leidėjų kišenes. Ta nemokslo populiarinimo banga, aišku, nuslūgs, bet ji liks pavojingas mokslo populiarinimo knygų konkurentas. Vienintelė išeitis — rašyti įdomias knygas apie mokslo atradimus, kurios laimėtų skaitytojų dėmesį.

Šios knygos tikslas — tęsiant susiklosčiusią tradiciją, pateikti šiuolaikinės fizikos mozaiką, suprantamai papasakoti, kas nauja pasaulio ir Lietuvos fizikų laboratorijose ir net galvose.

Autorių kolektyvas gali parašyti įvairiau ir plačiau negu vienas autorius, nors, antra vertus, skirtingi autoriai įvairiai įsivaizduoja būsimą

* Išleistų „Fizikos mokyklos" serijos knygų sąrašas pateikiamas šio leidinio pabaigoje.

skaitytoją ir savo uždavinį. Profesoriui nėra lengva suprasti, jog skaitytojas gali būti primiršęs klasikines fizikos tiesas ar net jų nežinoti. Tad kai kurių šios knygelės straipsnių skaitymas nėra labai lengvas laisvalaikio užsiėmimas, bet manau, jog atkaklus skaitytojas patirs tikrą pažinimo džiaugsmą.

Šio ir ankstesnių leidinių „Kas domina fizikus šiandien?" autoriai beveik nesikartoja. Išimtis — akademikas V. Ginzburgas. Visai atsitiktinai ir nepriklausomai prieš kiekvieno leidinėlio rengimą jis paskelbia eilinį įdomiausių fizikos problemų sąrašą ir būna tiesiog neįmanoma „nuslėpti" jo nuo mūsų skaitytojų. Tiesa, dabar tas sąrašas su komentarais jau virto atskira knyga, o čia pateikiame tik paties autoriaus esė apie ją, aišku, su trumpu svarbiausių problemų sąrašu.

Kiti šios knygos autoriai — Lietuvos fizikai, dirbantys mūsų fizikos centruose: Fizikos, Puslaidininkų fizikos, Teorinės fizikos ir astronomijos institutuose ir Vilniaus universitete. Daugelio iš jų darbai lemia mūsų fizikos kryptis ir laimėjimus. Trumpos autorių biografijos pateiktos knygos pabaigoje.

Įdomaus skaitymo, smalsusis skaitytojau.

R. KARAZIJA

VITALIJUS GINZBURGAS

KOKIOS FIZIKOS IR ASTROFIZIKOS PROBLEMOS ATRODO DABAR YPAČ SVARBIOS IR ĮDOMIOS *

Daugelis skaitytojų galbūt pastebėjo, kad jauni, netgi talentingi fizikai dažnai gerai išmano tik savo siaurą, specifinę sritį. Tarkime, paklausę kvantinio lauko teorijos specialisto apie superlaidumo arba feroelektros prigimtį, neutroninės žvaigždės struktūrą ar gravitacinių bangų registravimo būdus, jūs nesulauksite atsakymo. Tuo tarpu susipažinti su šiais ir daugeliu kitų dalykų nereikia daug laiko. Be to, kiekvienam aišku, kad fizikas turi būti plačių pažiūrų ir turėti daug žinių iš įvairių fizikos sričių, juk tai jam padės geriau dirbti ir savo tiesioginį darbą. Tad net didžiausi pragmatikai suinteresuoti turėti platesnį akiratį.

Čia ne vieta pradėti diskusiją, kodėl jaunieji fizikai taip specializuojasi ir kaip galima pakeisti padėtį bei užpildyti jų žinių spragas. Apie tai aš esu skaitęs studentams pažintinių paskaitų, kurios 1971 m. buvo išleistos tuo pačiu pavadinimu, kaip ir šis straipsnis. Ten išvardyta apie 20 problemų, kurios man atrodė ypač aktualios. Be to, pateikiau kiekvienos iš jų trumpą paaiškinimą ir literatūros sąrašą. Kadangi tas straipsnis buvo skirtas pradedantiesiems fizikams, teko aiškinti dalykus, labai aiškius patyrusiems specialistams. Tarp kitko, aš pabrėžiau, jog tas „ypač svarbių ir įdomių problemų" sąrašas yra sąlygiškas ir subjektyvus, todėl verta susipažinti ir su kitomis problemomis. Be to, kai kurios problemos gali būti išskirtos pagal jų svarbą technikai ar technologijai, pagal jų paslaptingumą ir pan. Deja, visko aprėpti neįmanoma, tad pedagoginiais ir pažintiniais tikslais tenka pasirinkti svarbiausias.

Neteko girdėti, kaip jaunieji fizikai reagavo į tą straipsnį ir jo vėlesnius papildytus variantus (minimus toliau). Tuo tarpu mano kolegos nerodė entuziazmo. Čia nevardysiu priekaištų, kuriuos man tada teko išgirsti; dažniausiai buvau kaltinamas praleidęs tas problemas, kurias sprendė mano kritikai. Tai, jų nuomone, liudijo, kad sąrašas yra netikęs. Vienas mano vyresnis draugas kartą pasakė: „Jei tu būtum atspausdinęs savo straipsnį prieš tapdamas Mokslų Akademijos nariu, tavęs tikrai nebūtų išrinkę". Ko gera, jis buvo teisus.

---

* Versta iš žurnalo: Physics Today. 1990. No 5, p. 10—11.

Nekreipdamas į tai dėmesio, aš toliau pildžiau ir tikslinau savo sąrašą. Taip straipsnis virto nedidele knyga, kuri vėliau buvo išversta į keletą kalbų. Paskutinis vertimas į anglų kalbą pasirodė 1985 m. (nors buvo parengtas spaudai 1981 m.). Dabar aš parašiau naują variantą*. Kiekvieną kartą, rengdamas spaudai, ne tik peržiūriu tekstą ir papildau jį naujausia medžiaga (tai yra būtina), bet ir sutrumpinu kai kurias dalis.

Dabartinis „ypač svarbių ir įdomių problemų" sąrašas atrodo taip:

Makrofizika

1. Valdoma branduolių sintezė.
2. Aukštatemperatūris superlaidumas; superdiamagnetizmas.
3. Naujos medžiagos (metalinio vandenilio ir kai kurių kitų medžiagų sukūrimas).
4. Kietojo kūno fizikos problemos.
5. Antrosios rūšies ir panašūs faziniai virsmai (kriziniai reiškiniai), įdomūs jų pavyzdžiai.
6. Paviršių fizika.
7. Skystieji kristalai: labai didelių molekulių tyrimai.
8. Medžiaga labai stipriuose magnetiniuose laukuose.
9. Razeriai, grazeriai ir supergalingi lazeriai.
10. Visiškai netiesiniai reiškiniai (netiesinė fizika).
11. Supersunkūs elementai (supertransuraniniai elementai); „egzotiški" branduoliai.

Mikrofizika

12. Dalelių masių spektras; kvarkai ir gliuonai; kvantinė chromodinamika.
13. Vieninga silpnųjų ir elektromagnetinių sąveikų teorija; W ir Z^0 bozonai; leptonai.
14. Didysis sąveikų sujungimas; protono skilimas; neutrino masė; magnetinis monopolis; superunifikacija; superstygos.
15. Fundamentalusis ilgis; didelės ir superdidelės energijos dalelių sąveikos.
16. CP invariantiškumo negaliojimas; netiesiniai reiškiniai vakuume ir superstipriuose magnetiniuose laukuose; faziniai virsmai vakuume.

Astrofizika

17. Bendrosios reliatyvumo teorijos eksperimentinis patikrinimas.
18. Gravitacinės bangos.
19. Kosmologinė problema; ryšys tarp kosmologijos ir didelių energijų fizikos.

---

*Гинзбург В. Л. О физике и астрофизике. Москва: Наука, 1992.

20. Neutroninės žvaigždės ir pulsarai.
21. Juodosios bedugnės.
22. Kvazarai ir galaktikų branduoliai; galaktikų susidarymas; slaptoji masė (tamsioji medžiaga) ir jos nustatymas.
23. Kosminių spindulių ir kosminių Rentgeno bei gama spindulių prigimtis; superdidelių energijų gama astronomija.
24. Neutrininė astronomija.

Apskritai pavadinimai kalba patys už save. Tik ketvirtą problemą reikėtų paaiškinti. Iš šio sąrašo ankstesnių variantų liko eksitonų (elektronų ir skylių porų) metalinio skysčio klausimas. Kietojo kūno fizikos problemos, kurios dabar yra svarbiausios (šuoliai metalas—dielektrikas, krūvio ir sukinių tankio bangos, netvarkieji puslaidininkiai, sukininiai stiklai, kvantinis Holo efektas, mezoskopija ir kai kurios kitos), mano naujoje knygoje tik paminėtos. Iš tikrųjų šios kategorijos medžiagų yra tiek daug, kad aš nusprendžiau „palikti jas už borto" ta prasme, jog nepateikiau net trumpų komentarų, kaip kitais atvejais.

Ilgainiui mano sąrašas keitėsi: vienos problemos buvo išbraukiamos, kitos pridedamos. Antai aukštatemperatūrio superlaidumo problema sąraše atsirado 1971 m., kada aukštatemperatūriai superlaidininkai dar nebuvo sukurti. Betgi klausimas ir dabar lieka labai svarbus: ateityje turėtume siekti superlaidumo kambario temperatūroje. Be to, aš pridėjau superdiamagnetizmą, tai yra problemą medžiagų, kurios nėra superlaidininkai, bet pasižymi gana dideliu diamagnetiniu jautriu.

Aš manau, kad kiekvienas fizikas turėtų šiek tiek žinoti apie visas problemas, įtrauktas į sąrašą. Susipažinti su jomis tik bendrais bruožais, be formulių, mano įsitikinimu, nebūtų sunku.

Iš anglų kalbos vertė *R. Karazija*

STIVENAS V. HOKINGAS
(Stephen W. Hawking)

LAIKO STRĖLĖ *

Mūsų požiūris į laiką kito. Iki pat šio šimtmečio pradžios manyta, kad laikas yra absoliutus, t. y. kad tuo, ką vadiname „laiku", kiekvienas įvykis gali būti žymimas tik vienu būdu, o matuojant laiko tarpą tarp dviejų įvykių, visų gerų laikrodžių parodymai sutampa. Tačiau atradimas, kad šviesos greitis yra vienodas kiekvienam stebėtojui, nepriklausomai nuo to, kaip jis juda, vedė prie reliatyvumo teorijos, o joje minties apie vienintelį absoliutų laiką teko atsisakyti. Kiekvienam stebėtojui — jo laikrodžiu matuojamas laikas: įvairių stebėtojų laikrodžių parodymai nebūtinai turi sutapti. Taip laikas tapo labiau asmenine sąvoka, susijusia su jį matuojančiu stebėtoju.

Bandant sujungti gravitaciją su kvantine mechanika, imta vartoti „menamojo" laiko sąvoką. Menamojo** laiko kryptis niekuo nesiskiria nuo erdvės krypties. Eidamas į šiaurę, gali apsisukti ir po to eiti į pietus. Lygiai taip pat ir „menamajame" laike: jeigu gali eiti pirmyn, tai gali ir apsisukti, o paskui eiti atgal. Tai reiškia, kad tarp „menamojo" laiko krypčių pirmyn ir atgal gali nebūti jokio svarbaus skirtumo. Antra vertus, visi žinome, kad „tikrame" laike kryptys pirmyn ir atgal labai skiriasi. Iš kur atsiranda šis skirtumas tarp praeities ir ateities? Kodėl prisimename praeitį, bet ne ateitį?

Mokslo dėsniai neskiria praeities nuo ateities. Tiksliau sakant, jie lieka nepakitę po derinio veiksmų (arba simetrijų), vadinamų *C*, *P* ir *T* (*C* — dalelių pakeitimas antidalelėmis; *P* — veidrodinis atspindys, kai sukeičiama vietomis kairė ir dešinė; *T* — visų dalelių judėjimo krypčių pakeitimas priešingomis, arba iš esmės judėjimo nukreipimas atgal). Mokslo dėsniai, kurie sąlygoja materijos elgesį visomis normaliomis sąlygomis, lieka nepakitę po *C* ir *P* veiksmų derinio. Kitaip sakant, kitos planetos gyventojų

---

* Versta iš knygos: Stephen W. Hawking. A Brief History of Time. Bantam Press: London — New-York—Toronto—Sydney— Auckland, 1991, p. 143—153.

** Bendrojoje reliatyvumo teorijoje atstumas ds tarp dviejų artimų keturmatės erdvės taškų išreiškiamas formule $ds^2 = -dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2$. Vietoj realaus laiko t vartojant „menamąjį" laiką $\tau = it$ ($i = \sqrt{-1}$), atstumas išreiškiamas formule $ds^2 = dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2$ ir skirtumas tarp erdvinių bei laiko koordinačių išnyksta.

gyvenimas būtų visai toks pat kaip mūsų, jeigu jie būtų mūsų veidrodiniai atspindžiai ir kartu sudaryti iš antimedžiagos, o ne iš medžiagos.

Jeigu mokslo dėsniai yra nepakeičiami *C* ir *P* veiksmų deriniu, taip pat ir *C*, *P* ir *T* deriniu, tai jie taip pat turi likti nepakitę vien po *T* veiksmo. Tačiau įprastame gyvenime tarp realaus laiko krypčių pirmyn ir atgal yra didelis skirtumas. Jeigu nufilmuotume puoduką su vandeniu, krintantį nuo stalo ir sudūžtantį į šukes, tai, žiūrėdami filmą, iš karto galėtume pasakyti, ar juosta sukama į priekį, ar atgal. Jeigu ji būtų sukama atgal, matytume, kaip šukės ant grindų staigiai pačios susirenka, virsta puoduku ir užšoka ant stalo. Teigti, kad juosta sukama atgal, galima dėl to, kad įprastame gyvenime tokios įvykių sekos niekada nebūna. Jeigu taip būtų, tai molinių indų gamintojai turėtų uždaryti savo firmas.

Kodėl sudužę puodukai nesusirenka iš šukių ir sveiki nepakyla ant stalo, aiškinama antruoju termodinamikos dėsniu. Jis teigia, kad bet kokioje uždaroje sistemoje netvarka, arba entropija, laikui bėgant visada didėja. Tai kitais žodžiais išreikštas Merfio dėsnis: daiktai visada linkę gesti! Sveikas puodukas ant stalo yra labai tvarkinga būsena, o sudaužytas ant grindų — netvarkinga. Galima lengvai pereiti nuo puoduko ant stalo praeityje prie sudužusio puoduko ant grindų ateityje, bet ne atvirkščiai.

Netvarkos, arba entropijos, didėjimas laikui bėgant yra pavyzdys laiko strėlės, kažko tokio, kas atskiria praeitį nuo ateities, suteikdamas laikui kryptį. Yra mažiausiai trys skirtingos laiko strėlės. Pirmoji — termodinaminė — tai laiko kryptis, kuria didėja netvarka, arba entropija; antroji — psichologinė — mūsų jaučiama laiko tėkmės kryptis (atsimename praeitį, o ne ateitį); trečioji — kosmologinė — kryptis, kuria Visata plečiasi, o ne traukiasi.

Aš įrodysiu, kad ribinės sąlygos Visatai nebuvimas drauge su silpnu antropiniu principu gali paaiškinti, kodėl visos trys strėlės rodo tą pačią kryptį ir, dar daugiau, kodėl laiko strėlė iš viso turi būti aiškiai nukreipta. Įrodysiu, kad psichologinė strėlė yra nustatyta termodinaminės strėlės ir kad abi šios strėlės būtinai visada rodo tą pačią kryptį. Jeigu tarsime, kad Visatai nėra ribinių sąlygų, tai pamatysime, kad turi būti aiškiai nukreiptos termodinaminė ir kosmologinė laiko strėlės, bet jos nebūtinai turi rodyti tą pačią kryptį per visą Visatos istoriją. Tačiau aš įrodysiu, kad, tik joms rodant tą pačią kryptį, gali susidaryti sąlygos, tinkamos vystytis protingoms būtybėms, kurios gali paklausti: „Kodėl netvarka didėja ta pačia laiko kryptimi, kuria Visata plečiasi?”

Pirmiausia aptarsiu termodinaminę laiko strėlę. Antrasis termodinamikos dėsnis išplaukia iš to, kad netvarkiųjų būsenų visada yra daugiau negu tvarkingųjų. Pavyzdžiui, imkime vaikišką galvosūkį: paveikslėlis supjaustytas į kvadratėlius, o šie sudėti į dėžutę. Iš jų paveikslėlį galima vėl

sudėstyti tik vienui viena tvarka. Antra vertus, juos galima išdėstyti įvairiausiai, bet paveikslėlio nesusidarys.

Tarkime, kad sistema iš pradžių yra vienoje iš nedaugelio tvarkingųjų būsenų. Laikui bėgant, sistema vystysis ir jos būsena kis. Greičiausiai ji pasidarys netvarki, nes netvarkiųjų būsenų yra daugiau. Taigi jeigu sistema iš pradžių buvo labai tvarkinga, tai netvarka ilgainiui didės.

Pavyzdžiui, kvadratėliai dėžutėje iš pradžių yra sudėti tvarkingai ir sudaro paveikslėlį. Dėžutę pakračius, jie susidėsto kitaip, tikriausiai netvarkingai, ir nesudaro viso paveikslėlio paprasčiausiai dėl to, kad netvarkingų išsidėstymų yra daug daugiau. Kai kurios kvadratėlių grupės dar gali sudaryti paveikslėlio dalis, bet kuo ilgiau dėžutę kratysime, tuo didesnė bus tikimybė, kad tos grupės suirs ir susidarys visiško kratinio būsena. Taip netvarka ilgainiui tikriausiai didės, jeigu pradinė būsena buvo labai tvarkinga.

Tarkime, kad Dievas nusprendė, jog Visatos raida turi baigtis tvarkinga būsena, bet visai nesvarbu, kokia pradinė būsena. Ankstyvaisiais laikotarpiais Visata, galimas dalykas, būtų netvarkiosios būsenos. Vadinasi, laikui bėgant, netvarka mažėtų. Matytume sudužusius puodukus, susirenkančius iš šukių ir pakylančius vėl ant stalo. Žmogiškosios būtybės, stebinčios tuos puodukus, turėtų gyventi Visatoje, kurioje netvarka mažėja.

Įrodysiu, kad tokių būtybių psichologinė laiko strėlė būtų nukreipta atgal. Tai yra jos turėtų atsiminti ateities įvykius, bet nežinotų, kas buvo praeityje. Kai puodukas sudužęs, jos atsimintų jį buvus ant stalo, bet jam esant ant stalo neatsimintų, kad jis buvo ant grindų.

Gana sunku kalbėti apie žmogaus atmintį, nes detaliai nežinome, kaip veikia smegenys. Tačiau žinome viską apie kompiuterio atmintį. Todėl aptarsime kompiuterio psichologinę laiko strėlę. Man atrodo, protinga manyti, jog kompiuterių laiko strėlė yra tokia pati, kaip žmonių. Jeigu taip nebūtų, tai, turint kompiuterį, kuris atsimena rytdienos kainas, biržoje būtų galima daug uždirbti.

Kompiuterio atmintis iš esmės yra įrenginys, turintis elementų, kurių kiekvienas gali būti vienoje iš dviejų būsenų. Paprastas pavyzdys yra skaitytuvai. Paprasčiausi skaitytuvai susideda iš virbų, o ant kiekvieno jų yra po rutuliuką, kuris gali būti vienoje iš dviejų padėčių. Kompiuterio atmintis, prieš ką nors joje užregistruojant, yra netvarki, kiekvienos iš dviejų galimų būsenų tikimybės vienodos (rutuliukai atsitiktinai išsidėstę ant skaitytuvų virbų). Atmintis, kai ją paveiks sistema, kurią reikia atsiminti, bus vienoje ar kitoje aiškiai apibrėžtoje būsenoje, atitinkančioje sistemos būseną (kiekvienas skaitytuvų rutuliukas bus virbo kairiajame arba dešiniajame gale). Taip atmintis pereina iš netvarkiosios būsenos į tvarkingąją.

Tačiau kad ji būtų norimoje būsenoje, reikia suvartoti tam tikrą energijos kiekį (pavyzdžiui, rutuliukui pastumti arba kompiuteriui maitinti). Ši energija išsisklaido kaip šiluma ir padidina netvarką Visatoje. Galima įrodyti, kad toji netvarka visada padidėja labiau negu tvarka pačioje atmintyje. Taigi šiluma, kurią išsklaido kompiuterį vėsinantis ventiliatorius, kai kas nors užregistruojama atmintyje, reiškia, kad bendras netvarkos kiekis Visatoje padidėja. Kompiuteris atsimena praeitį ta pačia laiko kryptimi, kuria didėja netvarka.

Štai kodėl mūsų subjektyvų laiko krypties jausmą, psichologinę laiko strėlę mūsų smegenyse, nustato termodinaminė strėlė. Kaip ir kompiuteris, mes privalome dalykus atsiminti ta tvarka, kuria entropija didėja. Tai antrąjį termodinamikos dėsnį daro beveik trivialų. Netvarka laikui bėgant didėja todėl, kad laiką matuojame ta kryptimi, kuria netvarka didėja. Vargu ar gali būti dar labiau neginčytinas teiginys!

Bet kodėl termodinaminė laiko strėlė iš viso turi egzistuoti? Arba, kitaip tariant, kodėl Visata turi būti tvarkinga tame laiko gale, kurį vadiname praeitimi? Kodėl ji nebūna visiškai netvarkinga visais laikais? Pagaliau tai net atrodytų įtikinamiau. Ir kodėl ta laiko kryptis, kuria didėja netvarka, ir ta, kuria Visata plečiasi, sutampa?

Klasikinėje bendrojoje reliatyvumo teorijoje negalima numatyti, kaip Visata turėjo prasidėti, nes visi žinomi mokslo dėsniai ypatingajame Didžiojo sprogimo taške negalioja. Visata galėjo atsirasti, kai būsena buvo labai vienalytė ir tvarkinga. Tai būtų atvedę prie aiškiai nustatytų termodinaminės ir kosmologinės laiko strėlių, t. y. to, ką ir stebime. Bet ji lygiai taip pat galėjo atsirasti labai nevienalytėje ir netvarkingoje būsenoje. Tuo atveju Visatos būsena jau iš pradžių būtų buvusi visiškai netvarkinga, ir netvarka būtų negalėjusi ilgainiui didėti. Ji arba būtų likusi pastovi (tokiu atveju nebūtų aiškiai nukreiptos laiko strėlės), arba būtų mažėjusi, o tada termodinaminė laiko strėlė rodytų priešingą kryptį negu kosmologinė. Nė viena iš šių galimybių neatitinka to, ką matome. Kai laiko ir erdvės kreivumas pasidaro didelis, klasikinė bendroji reliatyvumo teorija tampa bejėgė. Tada pasidaro svarbūs kvantiniai gravitaciniai efektai, ir klasikinės teorijos neužtenka. Sužinoti, kokia pradžioje buvo Visatos būsena, galima remiantis kvantine gravitacijos teorija.

O kad tai padarytume tiksliau, dar turėtume pasakyti, kaip galimos Visatos raidos istorijos būtų atrodžiusios praeityje, prie erdvės ir laiko ribos. Tai, kas nežinoma ir negali būti žinoma, lengviau aprašytume tik tada, jeigu istorijos patenkintų ribos nebuvimo sąlygą: jos (istorijos) yra baigtinės, bet neturi ribų, kraštų arba ypatingųjų taškų. Tuo atveju laiko pradžia turėtų būti paprastas niekuo neypatingas erdvės ir laiko taškas, ir Visata turėtų būti pradėjusi plėstis iš labai vienalytės ir tvarkingos

būsenos. Ta būsena negalėjo būti visiškai vienalytė, nes tai pažeistų kvantinės teorijos neapibrėžtumo principą. Turėjo būti dalelių tankio ir greičių mažos fliuktuacijos. Tačiau ribos nebuvimo sąlyga reiškia, kad šios fliuktuacijos buvo tokios mažos, kiek tai leidžia neapibrėžtumo principas.

Visatos evoliucija turėjo prasidėti nuo eksponentinio, arba „infliacinio", plėtimosi laikotarpio, per kurį ji labai padidėjo. Per šį plėtimąsi tankio fliuktuacijos iš pradžių turėjo išlikti mažos, o vėliau — didėti. Sritys, kur tankis buvo truputį didesnis negu vidutinis, turėjo plėstis lėčiau dėl perteklinės masės gravitacinės traukos. Galų gale jos nustojusios plėstis ir kolapsavusios — sužniugusios, sudarydamos galaktikas, žvaigždes ir tokias būtybes, kaip mes. Visata galėjo iš pradžių būti vienalytė ir tvarkinga, o laikui bėgant pasidaryti gruoblėta ir netvarkinga. Tai paaiškintų termodinaminės strėlės buvimą.

Bet kas atsitiktų, jei Visata nustotų plėstis ir imtų trauktis? Ar termodinaminė strėlė pasisuktų ir netvarka laikui bėgant pradėtų didėti? Tai suteiktų visokių mokslinės fantastikos galimybių žmonėms, kurie patirtų perėjimą iš plėtimosi fazės į traukimosi. Ar jie matytų, kaip susirenka sudužusių puodukų šukės ir pakyla ant stalo? Ar galėtų atsiminti rytdienos kainas biržoje ir turtėti? Gal truputį ankstoka nerimauti dėl to, kas atsitiks, kai Visata kolapsuos, juk ji nepradės trauktis mažiausiai dar dešimt tūkstančių milijonų metų. Bet yra greitesnis būdas tai sužinoti — šuolis į juodąją bedugnę. Žvaigždės kolapsas virstant juodąja bedugne yra panašus į visos Visatos subliuškimo paskutinę stadiją. Todėl, jeigu Visatai susitraukiant, netvarka turi mažėti, galėtume laukti, kad ji mažės ir juodojoje bedugnėje. Taip galbūt astronautas, įkritęs į juodąją bedugnę, galėtų ten užsidirbti pinigų, lošdamas rulete, dar prieš savo statymą atsimindamas, kur pateks rutuliukas. (Deja, nežiūrint to, jis neilgai loštų prieš tapdamas spagečiu. Jis negalėtų nei mums pranešti apie termodinaminės strėlės krypties pasikeitimą, nei bankui apie savo laimikį, kadangi dingtų už juodosios bedugnės įvykių horizonto.)

Iš pradžių aš maniau, kad netvarka turėtų mažėti, kai Visata subliūkšta, nes buvau įsitikinęs, jog Visata turi grįžti į tvarkingąją būseną, kai ji vėl tampa maža. Tai reikštų, kad susitraukimo fazė būtų lyg plėtimosi fazės laiko apgręžimas. Žmonės susitraukimo fazėje savo gyvenimus gyventų priešinga kryptimi: jie mirtų prieš gimdami ir, Visatai traukiantis, darytųsi jaunesni.

Ši idėja yra patraukli, nes ji reiškia, kad plėtimosi ir traukimosi fazės gražiai simetriškos. Tačiau jos negalima priimti savo paties atsakomybe, neatsižvelgus į kitų nuomones apie Visatą. Reikia išsiaiškinti, ar tam būtinas ribos nebuvimas, ar ji nesuderinama su šia sąlyga? Kaip sakiau, aš iš pradžių maniau, kad ribų nebuvimo sąlyga iš tikrųjų reiškia, kad su-

sitraukimo fazėje netvarka turėtų mažėti. Mane iš dalies suklaidino analogija su Žemės paviršiumi. Jeigu laikysime, kad Visatos pradžia atitinka Šiaurės ašigalį, tai Visatos pabaiga turėtų būti panaši į pradžią taip, kaip Pietų ašigalis panašus į Šiaurės. Tačiau Šiaurės ir Pietų ašigaliai atitinka Visatos pradžią ir pabaigą „menamajame" laike. Pradžia ir pabaiga „realiajame" laike gali būti labai skirtingos. Aš taip pat buvau suklaidintas darbo, kurį dariau, naudodamas paprastą Visatos modelį: subliuškimo fazė buvo panaši į apgręžtą laike plėtimosi fazę. Tačiau mano kolega Donas Peidžas (Don Page) iš Pensilvanijos valstijos universiteto nurodė, kad ribų nebuvimo sąlyga nereikalauja, jog susitraukimo fazė būtinai būtų apgręžta laike plėtimosi fazė. Toliau vienas mano studentų Raimondas Leflemas (Raimond Leflamme) nustatė, kad truputį sudėtingesniame modelyje Visatos kolapsas labai skiriasi nuo plėtimosi. Aš supratau, kad padariau klaidą: ribų nebuvimo sąlyga reiškia, kad, Visatai traukiantis, netvarkos didėjimas turėtų tęstis. Termodinaminė ir psichologinė laiko strėlės nepasisuks juodųjų bedugnių viduje arba kai Visata pradės iš naujo trauktis.

Ką darytumėte radęs tokią klaidą? Kai kurie žmonės niekada neprisipažįsta klydę ir toliau atradinėja naujus, dažnai tarpusavyje nesuderinamus argumentus palaikyti savo idėjoms, kaip tai darė Edingtonas, prieštaraudamas juodosios bedugnės teorijai. Kiti tvirtina iš tikrųjų nepalaikę klaidingos nuomonės, o jeigu tai darę, tai tik tam, kad parodytų, jog ji neteisinga. Man atrodo, kad daug geriau viešai prisipažinti klydus. Tai padėtų išvengti painiavos. Geras pavyzdys yra A. Einšteinas, kuris kosmologinės konstantos įvedimą, bandant sukurti statišką Visatos modelį, vadino didžiausia savo gyvenimo klaida*.

Grįžtant prie laiko strėlių, lieka klausimas: kodėl mes matome, kad termodinaminė ir kosmologinė laiko strėlės rodo tą pačią kryptį? Arba, kitaip tariant, kodėl netvarka didėja ta pačia laiko kryptimi, kuria Visata plečiasi? Jeigu manome, kad Visata plėsis, paskui vėl trauksis (taip, atrodo, turėtų būti dėl ribų nebuvimo sąlygos), tai kyla klausimas, kodėl mes turime būti plėtimosi, o ne traukimosi fazėje.

Į tai galima atsakyti remiantis silpnu antropiniu principu — sąsaja su žmogumi. Susitraukimo fazėje būtų netinkamos sąlygos egzistuoti protingoms būtybėms, kurios galėtų paklausti: „Kodėl netvarka didėja ta pačia laiko kryptimi, kuria Visata plečiasi?" Išsipūtimas ankstyvosiose stadijose, kurį numato ribų nebuvimo prielaida, reiškia, kad Visata turi plėstis greičiu, labai artimu kritiškajam, kuriam esant ji išvengtų susitraukimo atgal, tad Visata nekolapsuos dar labai ilgai. Iki tol visos žvaigždės bus

* Dabar vargu ar galima teigti, kad tai buvo didelė klaida, tad šis pavyzdys sąlygiškas (žr. žurnalą „Природа". 1990. Nr. 1, p. 89).

sudegusios, o jų protonai ir neutronai tikriausiai bus virtę lengvesnėmis dalelėmis ir spinduliuote (fotonais). Visata bus visiškos netvarkos būsenoje. Neturėtų būti aiškios termodinaminės laiko strėlės. Netvarka negalėtų daug padidėti, nes Visata jau būtų beveik visiškos netvarkos būsenoje. Tuo tarpu, kad veiktų protinga gyvybė, būtina aiški termodinaminė strėlė. Žmogiškosios būtybės, kad gyventų, turi vartoti maistą, kuris yra energijos tvarkinga forma, ir versti jį šiluma, kuri yra netvarkinga energijos forma. Todėl protinga gyvybė negalėtų egzistuoti Visatos susitraukimo fazėje. Tai paaiškinimas, kodėl mes matome termodinaminės ir kosmologinės laiko strėlių sutapimą. Visai ne todėl, kad Visatos plėtimasis sukelia netvarkos didėjimą. Būtent ribų nebuvimo sąlyga yra visko priežastis. Dėl jos didėja netvarka, o sąlygos protingai gyvybei susidaro tik plėtimosi fazėje.

Apibendrinsime. Mokslo dėsniai neskiria laiko tėkmės pirmyn ir atgal krypčių. Tačiau yra mažiausiai trys laiko strėlės, kurios atskiria praeitį nuo ateities. Tai termodinaminė strėlė — laiko kryptis, kuria didėja netvarka; psichologinė strėlė — laiko kryptis, kuria mes atsimename praeitį, bet ne ateitį; kosmologinė strėlė, kuria Visata plečiasi, o ne traukiasi. Aš parodžiau, kad termodinaminė strėlė iš esmės yra ekvivalenti psichologinei, tad jos visada turi rodyti tą pačią kryptį. Darant Visatos ribų nebuvimo prielaidą, galima aiškiai apibrėžti termodinaminę laiko strėlę, nes Visata turėjo atsirasti labai vienalytėje ir tvarkingoje būsenoje. O mūsų stebimos termodinaminė ir psichologinė laiko strėlės sutampa dėl tos priežasties, kad protingoms būtybėms egzistuoti tinka tik plėtimosi fazė. Susitraukimo fazė bus netinkama, nes ji neturi aiškios termodinaminės laiko strėlės.

Visatos pažinimo pažanga sukūrė nedidelį tvarkos kamputį vis labiau netvarkingoje Visatoje. Jeigu įsiminėte kiekvieną šios knygos žodį, tai jūsų atmintis užregistravo maždaug du milijonus vienetų informacijos: tvarka jūsų smegenyse padidėjo maždaug dviem milijonais vienetų. Tačiau kol jūs skaitėte knygą, mažiausiai tūkstantį kalorijų tvarkingos energijos, kurią gavote maisto pavidalu, pavertėte netvarkinga energija, šiluma ir perdavėte ją aplinkai konvekcijos būdu ir prakaituodamas. Tai padidino netvarką Visatoje maždaug 20 milijonų milijonų milijonų milijonų vienetų (2×10^{25}), arba 10 milijonų milijonų milijonų (10^{19}) kartų, daugiau, negu padidėjo tvarka jūsų smegenyse. Ir tai, jeigu atsiminėte viską iš šios knygos.

Iš anglų kalbos vertė *K. Makariūnas*

BONIFACAS VENGALIS

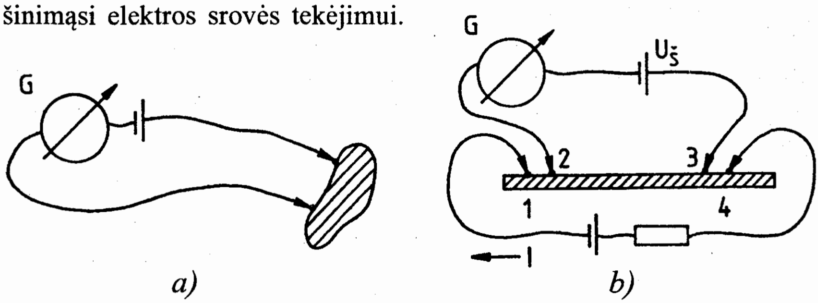
SUPERLAIDUMAS SIŪLO SAVO PASLAUGAS

Sparčiai plėtojantis elektronikos pramonei, puslaidininkiniai tranzistoriai dar ne taip seniai pakeitė elektronines lempas, o šiandien šiuos tranzistorius baigia nurungti puslaidininkinės mikroschemos. Tačiau būtų klaidinga manyti, kad ir jos liks nepakitusios visiems laikams. Ar neatsitiks vieną gražią dieną su moderniu šiuolaikiniu kompiuteriu gal po dvidešimties, o gal ir po dešimties metų taip, kaip šiandien yra atsitikę su lempiniu radijo imtuvu?

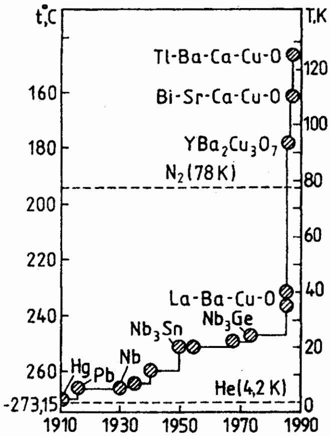
Vis dažniau girdime kalbant apie naujas superlaidžiąsias medžiagas. Galbūt netolimoje ateityje jos iš mokslinių tyrimų laboratorijų persikels į mūsų kasdienį gyvenimą. Tad noriu supažindinti smalsų skaitytoją su paslaptinguoju superlaidumo reiškiniu, intriguojančia jo atradimo istorija ir pateikti žinių apie neseniai atrastus superlaidininkus bei jų naudojimą.

Elektrinė varža, elektrinis laidumas, superlaidumas

Neabejoju, jog daugeliui iš jūsų yra tekę matyti ommetrą — elektrinės varžos matavimo prietaisą. Jame, kaip žinia, įmontuotas elektros srovės šaltinis ir rodyklinis arba skaitmeninis elektros srovės matuoklis (1 pav., *a*). Prijungus du tokio prietaiso laidus prie kieto ar skysto laidininko, susidariusia elektrine grandine pradeda tekėti stipresnė ar silpnesnė elektros srovė. Tačiau vien pažiūrėjus į rodyklinio prietaiso skalę, galima įsitikinti, kad kuo mažiau pasislenka rodyklė (kuo silpnesnė srovė), tuo didesnė matuojama varža. Taigi elektrinė varža yra fizikinis dydis, rodantis priešinimąsi elektros srovės tekėjimui.



1 pav.
Paprastas (*a*) ir patobulintas (*b*) elektrinės varžos matavimo būdai



2 pav.
Superlaidininkų krizinių temperatūrų rekordai

Įvairios medžiagos apibūdinamos jų specifine varža ρ, arba varža, kurią turėtų 1 m^2 skerspjūvio ploto ir 1 m ilgio tos medžiagos bandinys. Dažnai tam taikomas ir atvirkščias varžai dydis — elektrinis laidumas σ ($\sigma = 1/\rho$). Pagal specifinės varžos arba elektrinio laidumo vertes, išmatuotas esant normaliai (kambario) temperatūrai, medžiagos skirstomos į tris grupes: didelės varžos dielektrikus, puslaidininkius ir labai laidžius elektrai metalus.

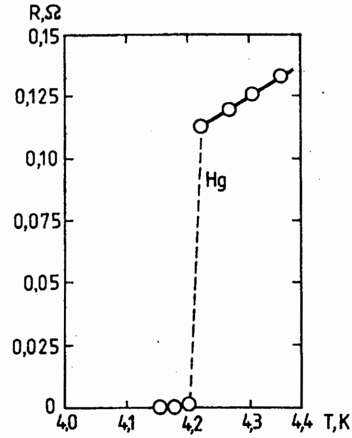
Tačiau dalis metalų, jų metališkųjų lydinių bei junginių (metalų oksidų, nitridų, ...) ir netgi kai kurie puslaidininkiai, atšaldyti iki jiems būdingos vadinamosios krizinės temperatūros T_c, staiga pereina į nepaprastai mažos varžos (superlaidžiąją) būseną. Elektrinės varžos sumažėjimo (ar net išnykimo) reiškinys pirmą kartą buvo atrastas dar XX amžiaus pradžioje, tiriant visiems gerai žinomą gyvsidabrį. Šio metalo krizinė temperatūra labai žema: tik keliais laipsniais aukštesnė už absoliutinį nulį (–273,15°C). Tokiai žemai temperatūrai pasiekti iki šiol naudojamos suskystintos helio dujos. Helio virimo temperatūra absoliutinėje Kelvino temperatūrų skalėje lygi 4,2° (4,2 K).

Neilgai trukus, buvo nustatyta, kad superlaidumas būdingas švinui (T_c= 7,2 K), vėliau — niobiui (T_c = 9,2 K), dar vėliau — kitiems metalams bei jų lydiniams. Šiuo metu įvairių superlaidžiųjų medžiagų skaičius jau gerokai viršija tūkstantį. Gana ilgai, iki 1986 metų, superlaidumo temperatūros rekordas laikėsi ties 23,2 K, ir tik prieš keletą metų, atradus superlaidžiąsias keramikas, prasidėjo pats tikriausias tos temperatūros šturmas. Per palyginti trumpą laiką T_c rekordas pakilo iki 125 K (žr. T_c augimo dinamiką, parodytą 2 paveiksle).

Taikant superlaidininkus praktiniams reikalams, labai svarbus buvo medžiagų, kurių T_c aukštesnė už skysto azoto temperatūrą (78 K), atradimas. Superlaidininkus šaldyti jau buvo galima ne brangiu heliu, bet beveik šimtąkart pigesniu ir kur kas plačiau technikoje naudojamu azotu. Aštuonis dešimtmečius tyrinėdami superlaidininkus, fizikai atskleidė daugybę jų taikymo sričių. Deja, skystu heliu šaldomą techniką iki šiol dažniausiai pavykdavo įrengti tik specialiose laboratorijose. Todėl, keičiant helį azotu, superlaidumui atveriamos kur kas didesnės perspektyvos. Bet, prieš pradėdami nagrinėti superlaidumo siūlomas paslaugas, dar kartą grįžkime prie paties reiškinio ir gana įdomios jo atsiradimo istorijos.

Superlaidumo reiškinio atradimas

Superlaidumo atradėju 1911 m. tapo olandų fizikas Heikė Kamerlingas Onas (H. K. Onnes). Prieš porą metų (1909 m.) jam, beje, taip pat pirmajam, buvo pasisekę suskystinti helio dujas ir pasiekti eilinį žemų temperatūrų pasaulio rekordą. Prisigaminęs pakankamai unikalaus šaltojo skysčio, mokslininkas ryžosi tyrinėti elektrines metalų savybes. Toks sprendimas buvo visiškai dėsningas, nes kaip tik tuo metu buvo kuriama klasikinė metalų elektrinio laidumo teorija ir jau susidariusi vieninga nuomonė, jog elektros srovė metaluose — tai kryptingas elektroninių dujų judėjimas.



3 pav.
H. K. Ono išmatuota gyvsidabrio stulpelio elektrinės varžos temperatūrinė priklausomybė ties superlaidžiuoju virsmu

Apibendrindamas ankstesnius kai kurių metalų elektrinės varžos matavimų duomenis įvairioms temperatūroms, H. K. Onas buvo šventai įsitikinęs, kad pakankamai išgrynintų šių metalų varža turėtų išnykti kaip tik ties skysto helio temperatūra. Savo samprotavimams pagrįsti mokslininkas išvedė empirinę formulę, puikiai atitinkančią beveik visus iki tol žinomus eksperimentinius duomenis. Tyrimams labiausiai tiko gyvsidabris, nes jo gryninimo technologija tais laikais buvo pakankamai tobula. Mokslininką nelabai stebino tai, kad gyvsidabrio stulpelio varža ties helio temperatūra iš tikrųjų išnyko. Nerimą daugiau kėlė nepakankamas aparatūros jautrumas. Be to, visai arti helio skystėjimo taško varža imdavo mažėti labai sparčiai, o tai jo teorijoje nebuvo numatyta. Čia reikėtų atkreipti dėmesį į tai, kad, matuojant labai mažas bandinių varžas anksčiau nurodytu būdu (žr. 1 pav., *a*), būtina atsižvelgti į jungiamųjų laidų bei sanglaudų varžą. Išradingasis mokslininkas nesunkiai įveikė ir šią kliūtį. 1 pav., *b* parodyta varžos matavimo schema, kurią taikydamas H. K. Onas pasiekė 10^{-5} Ω tikslumą. Gyvsidabrio stulpelio varža tarp sanglaudos taškų *2* ir *3* (R_{23}) buvo randama pagal įtampos kritimą U_{23}, o šis — parenkant tokią šaltinio įtampą $U_š = U_{23}$, kad srovė matavimo grandine netekėtų. Aišku, jog, patenkinus šią sąlygą, galvanometro rodyklė nenukryps nuo nulio net ir gerokai pasikeitus sanglaudų *2* ir *3* varžoms.

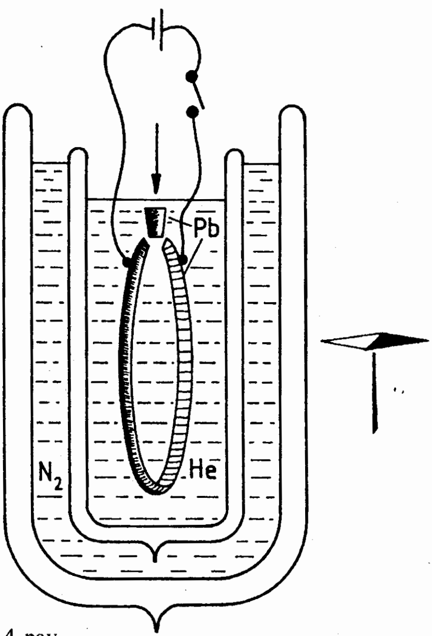
3 paveiksle parodyta tokiu būdu H. K. Ono išmatuota gyvsidabrio varžos temperatūrinė priklausomybė, davusi pradžią naujai mokslo ir technikos krypčiai.

Apie paslaptingą staigaus varžos išnykimo reiškinį ilgą laiką buvo kalbama kaip apie nereikšmingą gamtos išdaigą. Jo tikrosios vertės nesugebėjo suvokti net Nobelio komitetas, 1913 m. paskyręs Onui eilinę premiją už ... helio skystinimo darbus.

Superlaidininkų savybės: idealus elektrinis laidumas, idealus diamagnetizmas

Jums tikriausiai jau kilo klausimas, kokia gi ta tikroji superlaidininko varža. Deja, vienareikšmio atsakymo į jį iki šiol dar nėra. Žinoma tik tiek, kad ji neįtikėtinai maža. Tuo pačiu tikslu H. K. Onas yra atlikęs eksperimentą, pavaizduotą 4 paveiksle. Buvo pagamintas švininis žiedas su įpjova ir tokios pat medžiagos intarpas. Įspraudęs (skystame helyje) intarpą į įpjovą, mokslininkas privertė srovę tekėti ratu superlaidžiu žiedu. Po to, išjungęs elektros šaltinį, pagal šalia pastatytos magnetinės rodyklės padėtį jis bandė nustatyti laiką, per kurį ši žiedu tekanti srovė išnyks. Deja, įsitikinti, ar ta srovė bent kiek slopsta, keleto valandų nepakako.

Dar ne taip seniai panašų eksperimentą pakartojo ir amerikiečiai. Jie vietoj žiedo naudojo superlaidžią ritę, be to, ir magnetinio matavimo aparatūra buvo nepalyginti tobulesnė. Šį eksperimentą, užsitęsusį pustrečių metų, nutraukė ... transporto darbuotojų streikas. Mat laiku nepristačius skysto helio, ritė sušilo ir, padidėjus jos varžai, ja tekėjusi srovė akimirksniu dingo. Tačiau pagal atliktus matavimus jau buvo galima daryti išvadą, kad superlaidininko varža turėtų būti bent 10^{18} kartų mažesnė už geriausių elektros laidininkų — vario ar sidabro — varžas, išmatuotas kambario temperatūroje.

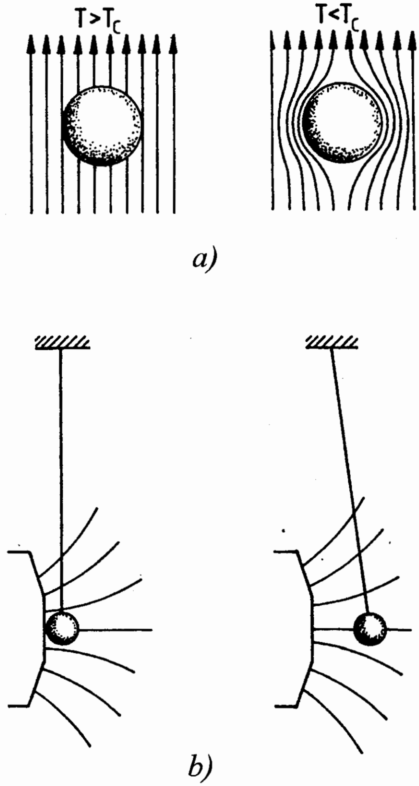


4 pav.
Srovės, tekančios superlaidžiu žiedu, slopimo tyrimas

Šiuose eksperimentuose nesunku įžvelgti didžiulę praktinę idealaus elektrinio laidumo naudą. Daugumą esamų elektros perdavimo linijų keisti šaldomomis superlaidžiomis vargu ar kada nors bus ekonomiškai naudinga, tačiau at-

skiras jų atkarpas, kuriomis teka labai stiprios srovės, — visiškai realu. Tuo tarpu superlaidžius žiedus ar rites pritaikyti dar lengviau. Štai kelių mikrometrų skersmens žiedelis, kuriuo teka nesilpnėjanti srovė, gali būti greitai veikiančio kompiuterio atminties elementas. Ritė iš superlaidaus laido jau senokai taikoma stipriems magnetiniams laukams kurti nedideliuose laboratoriniuose įrenginiuose, medicininiuose tomografuose, įgalinančiuose pamatyti piktybinius auglius, ir netgi didžiuosiuose šiuolaikiniuose elementariųjų dalelių greitintuvuose. Šiuo metu JAV yra statomas eksperimentinis didelės talpos superlaidus elektros energijos kauptuvas. Naktį elektros energija magnetinio lauko pavidalu turėtų būti kaupiama jo milžiniškose heliu šaldomose ritėse, o dieną atiduodama vartotojams.

Ne mažiau svarbi savybė, būdinga tik superlaidininkams, yra idealusis diamagnetizmas. Diamagnetikai — tai tokios medžiagos, kurios magnetiniame lauke, apibūdinamame stipriu H_0, indukuoja silpną, tačiau priešingos krypties vidinį magnetinį lauką H_v ($H_v = -\chi H_0$, $\chi = 10^{-5}$—10^{-7}). Tuo tarpu superlaidininkas gali būti laikomas diamagnetiku, kurio $\chi = 1$.



5 pav.
Magnetinio lauko jėgų linijų išstūmimas iš rutulio į jo išorę, kai rutulys pereina į superlaidžiąją būseną (*a*).
Jėga, veikianti superlaidųjį kūną nevienalyčiame magnetiniame lauke (*b*)

Nustatyta, kad normaliosios būsenos bandinio, virstančio superlaidžiuoju, paviršiumi pradeda tekėti tam tikro stiprio srovės, kurios sukuria vidinį lauką $H_v = -H_0$. Suminio magnetinio lauko ($H_0 + H_v$) linijos yra tarytum išstumiamos iš bandinio vidaus į išorę, kaip parodyta 5 paveiksle, *a*. Šį reiškinį, vadinamą Meisnerio efektu, 1933 m. atrado vokiečių mokslininkai V. Meisneris (V. Meissner) ir R. Oksenfeldas (R. Ochsenfeld).

Feromagnetikams, pavyzdžiui, geležiai ar nikeliui, būdingas kitoks ryšys: $H_v = \chi H_0$, $\chi >> 1$. Tikriausiai esate pastebėję, kad nevienalyčiame magnetiniame lauke

geležinį daiktą veikia jėga, nukreipta magnetinio lauko stiprėjimo kryptimi. Logiškai mąstant, diamagnetikus panaši jėga turėtų veikti priešinga kryptimi. Iš tikrųjų taip ir yra. Pakabintas ant siūlo superlaidžios medžiagos bandinys (žr. 5 pav., *b*) visada stengiasi nutolti nuo magneto poliaus. Visai neseniai viena privati japonų firma, gaminanti aukštatemperatūres superlaidžiąsias keramikas, gana sumaniai Meisnerio efektą pritaikė savo reklamai: plačiai tapo žinoma, kad tos firmos direktorius pirmasis visame pasaulyje skrido ant skystu azotu atšaldytos superlaidžios „skraidančiosios lėkštės".

Išaiškinus Meisnerio efektą, buvo surastas ryšys tarp išorinio magnetinio lauko ir neslopstančios paviršinės Meisnerio srovės. Netrukus nustatyta, kad magnetinis laukas vis dėlto sugeba prasiskverbti į tam tikrą gylį $l_L = 10^{-4}$ — 10^{-6} cm. Taip pat paaiškėjo, kad, pasiekus tam tikrą magnetinio lauko stiprio vertę H_c, medžiagos superlaidžiosios savybės išnyksta. Panašiai būna ir leidžiant bandiniu gana stiprią srovę, nes, kaip žinia, ji sukuria savą magnetinį lauką. Beje, šios savybės taip pat gali būti sėkmingai taikomos technikoje.

Pagrindiniai mikroskopinės superlaidumo teorijos teiginiai

Mikroskopinė teorija, paaiškinanti idealų superlaidininkų laidumą, Meisnerio efektą ir kitus dėsningumus, buvo sukurta 1957 m., praėjus beveik penkioms dešimtims metų nuo superlaidumo atradimo. Čia didžiausias nuopelnas tenka amerikiečiams Dž. Bardynui, (J. Bardeen), L. Kūperiui (L. Cooper) ir Dž. Šryferiui (J. Schrieffer). Jiems pavyko įrodyti, kad superlaidumas yra ne atskiro elektrono, o viso elektronų „kolektyvo" savybė. Traukdamas į save teigiamąjį elektros krūvį turinčius kristalinės gardelės jonus, kiekvienas elektros krūvininkas truputį deformuoja gardelę. Todėl tarp elektronų atsiranda trauka, tuo tarpu vakuume du vienodą elektros krūvį turintys elektronai visada stumia vienas kitą. Pateiksime silpnos deformacinės sąveikos pavyzdį: kūdroje, nežymiai deformuodamos vandens paviršių, viena kitą traukia mažytės plūdenos. Tačiau, pakilus bangoms, apie kažkokią trauką tarp šių mažyčių lapelį ir šaknelę turinčių augaliukų nėra ko nė kalbėti. Panašiai atsitinka ir elektronams: trauka tarp jų gali pasireikšti tik žemose temperatūrose, gerokai nurimus atomų virpesiams. Tik tada jiems paranku jungtis į vadinamąsias Kūperio poras ir taip šiek tiek sumažinti savo vidutinę energiją.

„Elektronų pora" — daugiau matematinė sąvoka, nes dviejų išskirtų elektronų „santuoka" yra trumpalaikė. Be to, „sutuoktiniai" nutolę vienas

nuo kito per daugelį kristalinės gardelės periodų ir tarp jų skrieja daugybė panašiai susigiminiavusių kaimynų. Superlaidumo teorijos kūrėjai parodė, kad dviejų elektronų trauka didžiausia tada, kai jie skrieja priešingomis kryptimis. Atstumas tarp dviejų taip sąveikaujančių elektronų (koreliacinis ilgis) įvairiuose superlaidininkuose nevienodas: nuo keleto iki kelių tūkstančių gardelės periodų. Elektronus superlaidininke galima būtų palyginti su šokėjais, kurie, nuolat keisdamiesi partneriais, pamažu juda kuria nors viena kryptimi. Elektronus ar jų poras kryptingai judėti verčia elektrinis laukas, tačiau kaip vis dėlto paaiškinti varžos išnykimą?

Esant normaliam elektriniam laidumui, elektros krūvininko elektriniame lauke įgytas kryptingas greitis ir su juo susijusi papildoma kinetinė energija perduodami gardelei — ji kaista. Tuo tarpu superlaidūs elektronai su gardele sąveikauja taip, kad vidutinė jos energija nekinta: vieno elektrono įgytą ir perduotą gardelei kryptingo greičio pokytį čia pat pasisavina suporuotasis partneris. Tokiu būdu elektronai per tarpininkę — gardelę — lyg kokią estafetės lazdelę vienas kitam perdavinėja kryptingą greitį ir energiją. Kad tai vyktų sklandžiai, elektronai turi judėti tvarkingai (koreliuotai). Tam tikslui estafetėje dalyvaujantys elektronai turi suvienodinti chaotiško judėjimo greičius (greičio arba impulso kondensacija) ir prisiderinti prie vieningo ritmo (fazių koherentiškumo sąlyga). Visus šiuos teiginius apibendrinantis vieningas kvantinis modelis turėjo didelę įtaką tolesnei mokslinės minties raidai ir, be abejonės, padėjo kryptingiau ieškoti naujų superlaidžių medžiagų.

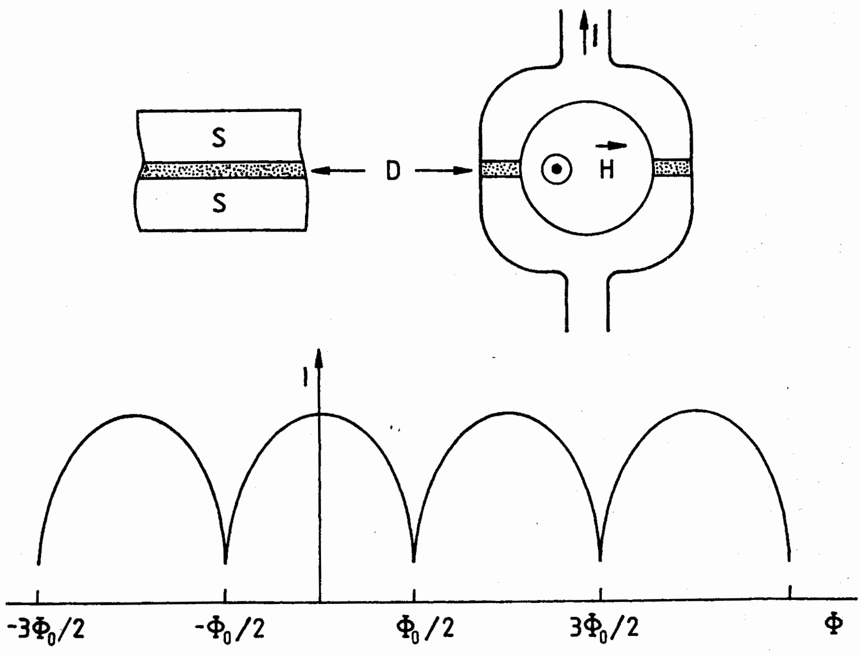
Magnetinio srauto kvantavimas. Džozefsono efektas. Skvidai

Esmingiausia superlaidumo atsiradimo prielaida yra fazių koherentiškumas, arba tolimoji elektronų kolektyvo tvarka, sąlygojanti idealų laidumą, Meisnerio efektą, taip pat kitus, tik superlaidumui būdingus reiškinius. Vienas iš jų — magnetinio srauto, prasiskverbiančio pro superlaidų žiedą, kvantavimas.

Superlaidžiame žiede, kaip ir ištisiniame superlaidininko bandinyje, pastovus išorinis magnetinis laukas indukuoja neslopstančią srovę, kuri sukuria priešingos krypties magnetinį lauką. Tačiau pro žiedą prasiskverbiančiam magnetinio lauko srautui Φ būdingas ryšys: $\Phi = n\Phi_0$; čia $n = 1, 2, 3, ...$, $\Phi_0 = 2 \cdot 10^{-15}$ Wb. Šis eksperimentais patvirtintas dėsningumas labai aiškiai atskleidžia banginę elektronų prigimtį — kad srovė žiede neslopų, jame sklindančios elektrono bangos fazė, apeinant žiedą ratu, turėtų keistis dydžiu, kartotiniu 2π.

Kitas ne mažiau svarbus reiškinys yra Džozefsono efektas. Jo esmė tokia. Įsivaizduokime du superlaidininkus, perskirtus plonyčiu dielektriko sluoksniu, kaip pavaizduota 6 paveiksle. Jei to sluoksnio storis bus ne didesnis už anksčiau minėtą elektronų poros koreliacinį ilgį, tai pro sudarytą vadinamąją tunelinę sandūrą galės tekėti superlaidi Kūperio porų srovė. Kitaip sakant, dielektrinis tarpas taip pat taps superlaidus. Iš to galima daryti įdomią išvadą: elektronas, nutolęs nuo superlaidininko per atstumą, neviršijantį koreliacinio ilgio, jaučia stiprų „kolektyvo" poveikį ir todėl dar gali būti laikomas pilnateisiu superlaidaus „kolektyvo" nariu. Šias drąsias išvadas savo diplominiame darbe, 1973 m. apdovanotame Nobelio premija, dar 1962 m. išsakė anglų studentas B. Džozefsonas (B. Josephson). Iš pradžių šios jaunojo fiziko išvados buvo sutiktos skeptiškai, tačiau vėliau patvirtintos gausiais eksperimentiniais faktais.

Magnetinio srauto kvantavimo ir Džozefsono tuneliniai reiškiniai buvo taikomi kuriant magnetiniam laukui jautrius elektroninius prietaisus — superlaidžiuosius kvantinius interferometrus, arba sutrumpintai — skvidus. Šie prietaisai sudaryti iš superlaidžių žiedelių su viena arba dviem Džozefsono sandūromis (žr. 6 pav.). Jie gali pakeisti, o pagal kai kuriuos para-



6 pav.
Džozefsono sandūra, dviejų sandūrų skvidas ir jo srovės priklausomybė nuo magnetinio lauko srauto pro kiaurymę

metrus netgi gerokai pranokti geriausius šiuolaikinius tranzistorius. Pagal jautrumą magnetiniam laukui skvidai iki šiol neturi sau lygių partnerių. Pritaikius įvairias technines gudrybes, daugeliui fizikinių dydžių, tokių, kaip elektros srovės stipris ar įtampa, galima gauti vienareikšmį magnetinio lauko atitikmenį. Tokiu būdu pavyko iškart keliomis eilėmis padidinti beveik visų matuojamų elektrinių dydžių tikslumą. Skvidų dėka dabar mažiausia padala įtampų skalėje yra 10^{-16} V, srovės stiprio — 10^{-11} A, o mažiausias dar išmatuojamas magnetinio lauko stipris siekia $10^{-16}\frac{A}{m}$. Tyrinėtojai, kuriems tenka dirbti su tokia jautria aparatūra, pasijunta tarsi prasitrynę akis. Staiga paaiškėjo, kad galvos smegenys, širdis ir kiti žmogaus organai skleidžia magnetinius laukus, kad galima užrašyti magnetinę kardiogramą ir gauti visiškai naują informaciją apie gyvąją ar negyvąją gamtą.

Vis dėlto panašūs matavimai šiuo metu dar mažai kam prieinami. Tokių matavimų aparatūra, beje, jai reikalingas skystas helis, yra gana sudėtinga. Norisi tikėti, kad, atrandant vis naujus aukštatemperatūrius superlaidininkus, panašių rūpesčių gerokai sumažės.

Bednorco ir Miulerio atradimas

Ieškant vis naujų superlaidininkų, krizinių temperatūrų vertės ilgą laiką buvo gana žemos. 1973 m. susintetinamas metališkasis Nb_3Ge, kurio $T_c =$ $= 23{,}2$ K išliko rekordinė ištisus 13 metų. Jau buvo girdima pesimistinių prognozių, kad superlaidžiosios būsenos ribinė temperatūra esanti lygi 30 — 40 K ir kartu ji pasmerkta visiems laikams likti helio temperatūrų nelaisvėje.

Laimei, atsirado tokių, kurie nepasitikėjo šviesiaisiais protais, kaip, pavyzdžiui, du šveicarų mokslininkai: kristalografas J. G. Bednorcas (J. G. Bednorz) ir segnetoelektrikų specialistas K. A. Miuleris (K. A. Muller). Panašu, kad nei vienas, nei kitas apie superlaidumą didesnio supratimo neturėjo. Jiedu labai susidomėjo trinariais junginiais, žymimais bendra formule ABO_3 ir turinčiais panašią perovskito kristalinę struktūrą. Šie junginiai gamtoje gana plačiai paplitę — daugiausia iš jų sudaryta Žemės mantija, — tačiau superlaidumo požiūriu tyrinėti palyginti mažai. Bednorcas su Miuleriu, be abejo, žinojo, kad vienas iš jų — stroncio titanatas $SrTiO_{3-x}$ ($x = 0 — 0{,}3$) tampa superlaidus 3 K temperatūroje, o jam giminingas bario-švino-bismuto oksidas $Ba(Pb,Bi)O_3$ — 13 K temperatūroje.

Nuo 1983 m. minėti mokslininkai susintetino ir patikrino apie 100 naujų medžiagų. Ir štai 1985 m. pabaigoje jiems atsitiktinai į rankas pateko prancūzų chemikų mokslinis straipsnis, kuriame teigiama, jog pagamintas

elektrai laidus bario-lantano-vario oksidas $Ba_2(La,Cu)O_4$. Jau turėdami neblogą patirtį, Bednorcas ir Miuleris netrukus susintetino minėtą junginį ir, atšaldę jį helio garais, pastebėjo staigų elektrinės varžos mažėjimą ties 35 K temperatūra. Norint galutinai įsitikinti, ar minėtas varžos mažėjimas tikrai susijęs su superlaidžiuoju medžiagos virsmu, reikėjo atlikti papildomus magnetinės skvarbos (Meisnerio efekto) matavimus. Tokiems matavimams mokslininkai tada dar nebuvo pasirengę. Galima buvo kreiptis į kolegas, turinčius šioje srityje didesnę patirtį, tačiau, bijodami per anksti atskleisti paslaptį, juodu nutarė paskelbti vien tik varžos matavimo duomenis. 1986 m. balandžio mėn. palyginti mažai žinomo mokslinio žurnalo „Zeitschrift für Physik" redakcijai išsiųstas pranešimas, kuriam vėliau buvo lemta tapti istoriniu: 1987 m. už šį darbą paskirta Nobelio premija.

Superlaidumo karštligė

Įvairių pranešimų apie aukštatemperatūrio superlaidumo egzistavimą būta ir anksčiau. Kai kurie jų iš pradžių buvo sukėlę didelį susidomėjimą, tačiau vėliau tapdavo vos ne pajuokos objektu, nes tokių pačių rezultatų po to niekas negalėdavęs pakartoti. Siekdami apsidrausti nuo panašaus likimo, Bednorcas ir Miuleris garsiojo pranešimo antraštėje įterpė žodžius: „galimas aukštatemperatūris superlaidumas". Galbūt todėl minėtu straipsniu, atspausdintu rugsėjo mėnesį, rimčiau susidomėjo tik S. Tanakos grupė iš Tokijo ir būrelis Hiūstono universiteto (JAV) tyrinėtojų, vadovaujamų kiniečių kilmės profesoriaus P. Čiu (P. Chu). Tuo metu, kai Bednorcas su Miuleriu atliko įtikinamus magnetinės skvarbos matavimus, abi minėtos grupės nepriklausomai viena nuo kitos patvirtino ankstesnį šveicarų laimėjimą. Tų pačių metų pabaigoje abiejų šių grupių atstovai susitiko JAV Bostono mokslinėje konferencijoje, kurioje padarė sensacingus pranešimus. Atrodo, kaip tik nuo šio momento ir prasidėjo tikroji superlaidumo karštligė. Tik per kelias savaites panašūs tyrimai buvo atlikti dar keliose pasaulio šalyse.

Netrukus P. Čiu su savo bendradarbiais pabandė suslėgti minėtąją medžiagą. Tokiu būdu pavyko T_c padidinti net iki 40 K. Čia pat kilo mintis sukurti vidinį (cheminį) slėgį, keičiant barį jam giminingais šiek tiek mažesniais stroncio atomais. Prielaida pasitvirtino — T_c buvo netgi didesnė kaip 40 K. Kitų metų sausio mėnesį tie patys mokslininkai šį kartą su savo kolegomis iš Alabamos universiteto šventė išties neeilinę pergalę: jų susintetinta naujoji medžiaga, kurioje lantanas pakeistas itriu, pasižymėjo rekordine 93 K krizine temperatūra. Azoto skystėjimo riba viršyta 13°!!! Medžiagos rekordininkės cheminė sudėtis $Y_{1,8}Ba_{0,2}CuO_4$, taip pat gamy-

bos būdas aprašyti žurnalo „Phys. Rev. Lett." (JAV) kovo mėnesio numeryje. Tačiau kai kurie tyrėjai kažin kokiu būdu jau anksčiau buvo sužinoję paslaptį. Tad po poros savaičių panašūs rezultatai buvo pasiekti iškart vos ne dešimtyje laboratorijų (JAV, Japonijoje, Kinijoje, buvusioje Sovietų Sąjungoje). Medžiaga rekordininkė pasirodė esanti nevienalytė: pro mikroskopą galima buvo įžiūrėti juodas ir žalias kruopeles. Paaiškėjo, kad superlaidžios yra tik juodosios. Jų cheminė sudėtis — $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ($x = 0$ — 0,5). Dabar šis superlaidus junginys sutrumpintai žymimas *123*.

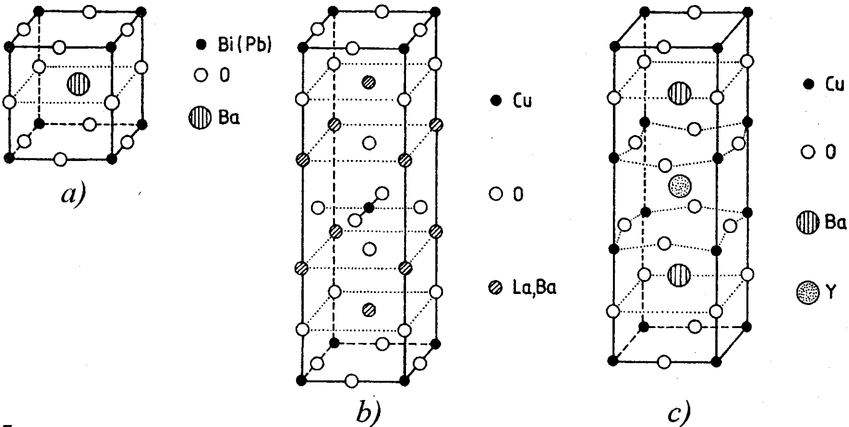
Labai greitai buvo pastebėta, kad itris junginyje *123* gali būti sėkmingai pakeistas kitais retųjų žemių elementais, tokiais, kaip La, Eu, Gd, Dy, Lu, Yb. Šiek tiek vėliau buvo atrasti panašią kristalinę struktūrą turintys superlaidūs bismuto junginiai. Jie gali būti užrašyti bendra formule $Bi_2Sr_2Ca_{n-1}Cu_nO_{2n+4}$. Giminingoms struktūroms $n = 1$, $n = 2$ ir $n = 3$ buvo išmatuotos T_c reikšmės, kurios atitinkamai lygios 20 K, (70 — 85) K ir 110 K.

Pabandžius panašiai pakeisti bismutą, labai greitai buvo atrasta superlaidžių talio junginių grupė: $Tl_2Ba_2Ca_{n-1}Cu_nO_{2n+4}$. Išmatuotos netgi aukštesnės krizinės šiems junginiams būdingos temperatūros: 60 K, 80 K ir 125 K. O visai neseniai, rengiant šią apžvalgą spaudai, pasiekė žinios apie gyvsidabrio junginį $HgCa_2Ba_2Cu_3O_8$, kurio suslėgto krizinė superlaidžiosios būsenos temperatūros vertė dar aukštesnė kaip 150 K. Atrodo, kad reikiamoms temperatūroms pasiekti ateityje nereikės ir skysto azoto. Ko gera, pakaks įsijungti nedidelį iš elektros tinklo maitinamą šaldytuvą.

Šis tas apie naująsias medžiagas

Labai greitai buvo nustatyta, kad visos naujos superlaidžiosios medžiagos turi sluoksniuotą kristalinę struktūrą ir yra priskiriamos tai pačiai perovskitų šeimai (žr. 7 pav., *a, b, c*). Vario junginių struktūrose specialistai atkreipė dėmesį į panašias vario—deguonies plokštumas, perskirtas Y(La) ar Ca tarpsluoksniais. Vėliau pasirodė, kad šios plokštumos kaip tik daugiausia ir susijusios su aukštatemperatūriu superlaidumu. Įdomu, kad, keičiant Y kitais retųjų žemių elementais, krizinė temperatūra pakinta labai nedaug. Tai rodo, jog superlaidieji elektronai sutelkti daugiausia ne retųjų žemių, Bi ar Tl, o vario—deguonies plokštumose.

Pagal elektrinį laidumą normaliojoje būsenoje naujosios medžiagos prilygsta blogiems metalams arba stipriai legiruotiems puslaidininkiams. Nevisiškai prisotintos deguonies, jos visos virsta didelės varžos puslaidininkiais. Tačiau persotinti deguonimi irgi nepageidaujama — nors didelis elektrinis laidumas lieka, tačiau superlaidžiosios savybės prarandamos.



7 pav.
Kristalinės oksidų superlaidininkų struktūros:
a — $Ba(Bi, Pb)O_3$ — paprastoji perovskito (T_c = 13 K);
b — $(La, Ba)_2CuO_4$ — su perovskito intarpu (T_c = 36 K);
c — $YBa_2Cu_3O_7$ — defektinis perovskitas (T_c = 92 K)

Pasirodžius naujiesiems superlaidininkams, iš pradžių atrodė, kad mikroskopinė BKŠ teorija nepajėgs paaiškinti aukštatemperatūrio superlaidumo, kad reikės kurti visiškai naują teoriją, galbūt net keisti požiūrį į superlaidumą. Vis dėlto, atrodo, minėtos teorijos šį kartą daug tobulinti dar nereikės. Patikimais eksperimentais įrodyta, kad naujuosiuose superlaidininkuose elektros srovę sukuria tokios pačios elektronų poros, nors jų būdingasis koreliacinis ilgis yra gerokai mažesnis (1 — 10 nm). Visoms naujosioms medžiagoms tinka dėsningumai, neprieštaraujantys anksčiau sukurtai teorijai. Vienintelis dar negalutinai išaiškintas dalykas — tai stiprios tarpelektroninės sąveikos prigimtis. Nors yra daugybė įvairių nuomonių, nustatyti teisingiausią kol kas dar negalima. Teoretikams šiuo metu belieka žvalgytis vienam į kitą ir įdėmiai klausytis, ką nauja pasakys eksperimentuotojai.

Masyvių superlaidžių bandinių gaminimas ir taikymas

Pirmieji naujųjų medžiagų bandiniai buvo susintetinti keraminiu būdu, kaitinant aukštose temperatūrose tas medžiagas sudarančių metalų oksidų ar jų karbonatų mišinius. Šį nesudėtingą gamybos būdą vienas Anglijos jaunimo žurnalas neseniai rekomendavo moksleiviams. Pagal jį, norint pagaminti jau minėtą *123* junginį, būtina tiksliai pasverti reikiamą kiekį

išdžiovintų Y_2O_3, CuO ir $BaCO_3$ miltelių, po to kruopščiai ir atsargiai juos sumaišyti (CuO ir $BaCO_3$ nuodingi!), mišinį sukratyti į karščiui atsparius aliuminio oksido keramikos indelius ir 10—20 val. kaitinti ore 900—940 °C temperatūroje. Kaitinamas $BaCO_3$ skyla į CO_2 dujas ir BaO, kuris, reaguodamas su vario ir itrio oksidų kruopelėmis, sudaro superlaidųjį *123* junginį.

Taip pagaminta medžiaga, netgi kelis kartus papildomai smulkinama, presuojama ir kaitinama, dažnai būna koreta ir nevienalytė. Pagal šį ne patį geriausią gaminimo būdą netgi pačias medžiagas imta vadinti superlaidžiosiomis keramikomis. Tačiau tai jokiu būdu nereiškia, kad negalima išauginti tobulų minėtų medžiagų kristalų ar susintetinti plonų monokristalinių plėvelių. Tiesa, šių medžiagų kristalai auga gana nenoriai, kartais ištisą mėnesį, o šitaip užauginti juodos spalvos monokristalai paprastai būna ne didesni kaip 1—2 cm. Bet to visiškai pakanka daugumai tyrimų atlikti.

Gaminant prietaisus, dažniausiai neužtenka, kad viena ar kita medžiaga būtų superlaidi. Daugeliu atvejų būtina ją pagaminti kaip galima tobulesnę. Sėkmė taikant superlaidininkus stiprių srovių įrenginiuose priklauso ir nuo to, ar galima iš jų pagaminti pakankamai lankstų ir ilgą laidą.

Anksčiau aprašyta keraminė gamybos technologija įgalina susintetinti didelį kiekį norimos superlaidžios medžiagos, kurios T_c vertės mažai skirtųsi nuo geriausių tos pačios cheminės sudėties monokristalų. Deja, dėl grūdėtos struktūros kriziniai tokių keramikų srovės tankiai būna daug mažesni už monokristalų. Tai gerokai riboja superlaidžiosios keramikos naudojimo galimybes. Tačiau pastaruoju metu ir čia po ilgoko pesimizmo laikotarpio padaryta nemaža pažanga. Įsitikinta, kad didelis slėgis ir dalinis keramikos aplydymas bandinius presuojant gerokai padidina krizinę srovę. Štai *123* junginio monokristalo skysto azoto temperatūroje rekordinė j_c vertė yra $3 \cdot 10^6$ A/cm^2, o geriausių keraminių bandinių ji jau siekia 10^5 A/cm^2. Manoma, kad nedideli superlaidūs magnetai, pagaminti iš tokios keramikos diskų, greitai turės nemažą paklausą.

Įpresuojant superlaidžiosios medžiagos miltelius į specialaus metalinio lydinio vamzdelius, ne per seniausiai pradėti gaminti ir superlaidieji laidai. Tokių laidų j_c verčių, taip pat jų ilgių rekordai iki šiol vis augo. Štai neseniai pasirodė reklaminiai pranešimai iš JAV, siūlantys pirkti aukštatemperatūrio *123* superlaidininko gijas, kurių skersmuo — 0,2 mm, ilgis — šimtas metrų, o krizinės srovės tankis skystajame azote — 10^4 A/cm^2. Tai jau atitinka dalį techninių reikalavimų, nors manoma, kad platesniam aukštatemperatūrių superlaidininkų diegimui pramonėje dar gali prireikti nuo penkerių iki dešimties metų.

Ploni superlaidininkų sluoksniai ir superlaidžioji elektronika

Pagrindiniai superlaidžiosios elektronikos elementai: superlaidžiosios plėvelės, daugiasluoksnės struktūros, Džozefsono sandūros, atminties elementai, netgi skvidai, buvo pagaminti ir išbandyti gerokai anksčiau, negu atsirado aukštatemperatūriai superlaidininkai. Todėl daug kam atrodė, kad, įvaldant naująsias medžiagas, nereikės gaišti daug laiko, kad pakaks pakartoti tai, kas buvo padaryta iki tol, tiriant ir taikant tradicinius superlaidininkus, tokius, kaip Nb ar Pb. Deja, ir čia dar kartą teko įsitikinti, jog lengvų pergalių nebūna.

Iki šiol ploni metalų, taip pat ir puslaidininkių sluoksniai dažniausiai buvo gaminami vakuume įvairiais medžiagų garinimo būdais. Pirmiausia paaiškėjo, kad tam tikslui anksčiau turėtą technologinę įrangą teks pertvarkyti, atsižvelgiant į naujųjų medžiagų poreikius. Toms medžiagoms ir jų plėvelėms sintetinti reikia gerokai aukštesnių temperatūrų, be to, ne didelio vakuumo, o aplinkos, kurioje būtų deguonies. Štai kodėl dalį vakuuminės aparatūros detalių teko pakeisti tokiomis, kurios būtų atsparios deguonies poveikiui. Be to, reikėjo ieškoti visai naujų dielektrinių medžiagų, tinkamų auginamų sluoksnių padėklams gaminti. Pageidautina, kad padėklui nekenktų deguonis, padėklo ir sluoksnio gardelių konstantos, taip pat jų plėtimosi koeficientai būtų kiek galima artimesni vieni kitiems, padėklo medžiaga būtų pigi ir nereaguotų su sluoksniu. Taigi iš daugumos patikrintų medžiagų liko MgO, nelegiruotas $SrTiO_3$, ZrO_2, $NdGaO_3$ ir keletas kitų karščiui atsparių oksidų.

Nors sunkumų daug, bet, gaminant naujųjų superlaidininkų sluoksnius, per pastaruosius 2—3 metus pasiekta didelių laimėjimų. Daugelyje pasaulio šalių, tarp jų ir gimtojoje Lietuvoje, šiuo metu jau sintetinami ploni (d = 10 — 1000 nm) monokristaliniai anksčiau nurodytų superlaidininkų sluoksniai ir jų dariniai.

Pasigaminus superlaidųjį sluoksnį, jau nėra labai sudėtinga fotolitografijos ar kokiu nors kitu būdu išėsdinti jame siaurus superlaidžius takelius, groteles, miniatiūrinius žiedelius, spirales ar kitokius elementus, įeinančius į įvairių prietaisų sudėtį. Tokiu būdu buvo pagaminti ir išbandyti spartūs superlaidieji fotodetektoriai, labai jautrūs infraraudonojo spinduliavimo jutikliai — bolometrai, elektrinių impulsų perjungikliai, elektrinių grandinių saugos elementai, aukštos kokybės rezonatoriai, elektrinių impulsų formos nekraipančios miniatiūrinės juostinės linijos ir daugelis kitų unikalių prietaisų. Šiuo metu daug tokių skystuoju azotu šaldomų prietaisų jau siūloma pirkėjams.

Nemažai nuveikta ir gaminant sudėtingesnius daugiasluoksnius darinius. 1991 m. pradžioje pirmą kartą išauginti plonasluoksniai dariniai, kuriuose du beveik vienodos kokybės superlaidaus junginio *123* sluoksniai perskirti plonu dielektriko tarpsluoksniu. Tai įgalino pagaminti pirmuosius skvidus, veikiančius skystojo azoto temperatūroje. Pastarieji jautrumu dar nusileidžia heliu šaldomiems savo giminaičiams, tačiau jau žinomi būdai, kaip padidinti jų jautrumą.

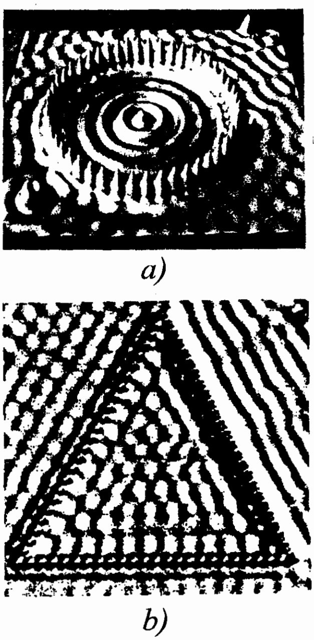
Dideli laimėjimai plonų sluoksnių technologijoje leidžia daryti optimistines prognozes ateičiai. Pagrindinių JAV firmų nuomone, artimiausiu metu turėtų būti baigtos kurti azotu šaldomos skvidų sistemos, infraraudonojo spinduliavimo matricos, kiek vėliau — atskiros loginės schemos, o apie 2000 m. laukiama spartaus kompiuterio iš superlaidininkų pasirodymo. Ateitis parodys, ar išsipildys šios prognozės.

Kaip bebūtų, jau dabar aišku, kad atrasti toli gražu dar ne visi aukštatemperatūriai superlaidininkai, o rekordinė 150 K krizinė temperatūra nėra riba. Nepaprastai plačios naujųjų medžiagų pritaikymo galimybės dar laukia savo kūrybine aistra ir ryžtu degančių atradėjų.

JUOZAS VIDMANTIS VAITKUS

„CHEMINIŲ" IR „GEOMETRINIŲ" POŽYMIŲ VARŽYBOS ATOMŲ IR ELEKTRONŲ PASAULYJE

Visokiausios medžiagos supa mus pasaulyje. Mėginant suvokti jų sandarą, buvo sukurti fizikos ir chemijos pagrindai (atrasti atomai, molekulės, elementariosios dalelės, suprasta ryšių tarp šių dalelių esmė). Atrastos ar sukurtos labai skirtingų savybių medžiagos, o iš jų pagaminti visokiausi prietaisai, kuriuose realizuotos tiek tų medžiagų savybės, tiek jų sąveikos tarpusavyje ar su jas supančiu pasauliu dėsningumai. Daugelis medžiagų sukuriamos apgalvotai (tam ir tarnauja medžiagų mokslo žinios), nors būna ir malonių netikėtumų (tarp tokių — gelžbetonio sukūrimas). Tačiau reikia pabrėžti, kad medžiagų kūrimas — tai gamtoje veikiančių dėsnių pažinimas ir jų pritaikymas atomų bei molekulių pasaulyje. Dabartinės fizikos žinios ir medžiagų technologijos galimybės per paskutinį ketvirtį amžiaus pažengė taip toli į priekį, kad sugebama iš esmės keisti medžiagos susidarymo principus, galima ne tik kalbėti apie medžiagas bei jų sandūras, bet ir jas realizuoti, net konstruoti (nebijau to žodžio, nes dabar jau yra atomų sluoksnių „montavimo" ir jų erdvinių struktūrų kūrimo metodų, vadinamų *medžiagų inžinerija*). 8 paveiksle pateikti tokios kūrybos rezultatai rodo, kad atomas tikrai yra lyg ir kokia „plyta", kurią galime „padėti" ten, kur norime, kartu ne tik sukurdami iš tokių atomų karkasą, bet ir nutiesdami ar užtverdami kanalus elektros srovei. Norint suvokti šiuos atradimus, reikia susipažinti su kai kuriais medžiagų mokslo dėsniais bei faktais, padedančiais suprasti naujovių esmę ir praverčiančiais toliau gilinantis į šią, vieną iš moderniausių mokslo ir technologijos sričių.



a)

b)

8 pav.
Dirbtinės atomų sandaros kristalo paviršiuje: *a* — apskritiminis „kvantinis koralas", pagamintas iš 48 geležies atomų, išdėstytų ant vario kristalo paviršiaus; „koralo" spindulys — 14,26 nm; *b* — trikampė sandara, padaryta iš 76 geležies atomų; jos plotas — apie 400 nm^2

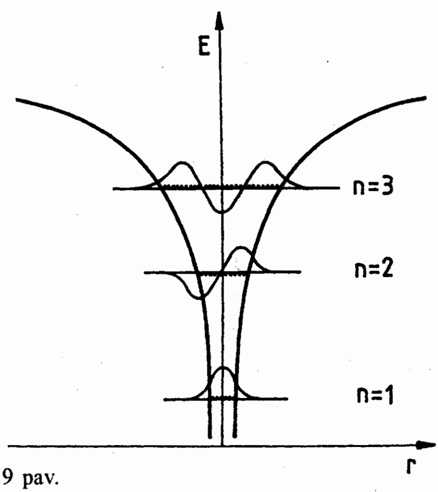
Įvadas

Pasaulyje vykstantys procesai didžia dalimi priklauso nuo jame dalyvaujančių kūnų temperatūros, o kūnų savybes lemia jų susidarymo temperatūra ir tolesnis jų formavimasis. Temperatūros sąvokos vartojimas reiškia, kad sistemoje vykstančius procesus apibūdina termodinaminės pusiausvyros dėsniai. Taigi kiekvieną vyksmą lydi priešingas jam vyksmas, ir jų greitis yra vienodas. Įsigilinus į tokių sistemų mikroskopinę sandarą, pastebėta, kad jų dalelės juda chaotiškai ir joms tinka (arba beveik tinka) idealiųjų dujų dėsniai. Tiriant šias sistemas, sužinota labai daug apie mūsų pasaulio sandarą, taip pat išsiaiškinta, kaip veikia šiluminės mašinos, atskleista daug metalų elektrinio laidumo bei visų medžiagų šiluminės talpos ir laidumo dėsningumų. Net plačiai žinomas teiginys „Nėra nieko praktiškesnio už gerą teoriją" buvo skirtas šios teorijos įvertinimui. Jei sistemos dalelių energija yra didelė, tai ją apibūdina klasikinė (Maksvelo ir Bolcmano) dalelių energijos pasiskirstymo funkcija. Mažesnės energijos dalelės gali būti dvejopos, o jų savybes nusako *sukinys* — dydis, kuris apibrėžia dalelės savitąjį judesio kiekio momentą. Viena rūšis — dalelės, kurių energija gali būti vienoda; jų sukinys apibūdinamas sveikaisiais skaičiais, ir jos vadinamos *bozonais*. Tarp kitos rūšies dalelių negali būti turinčių tą pačią energiją; jų sukinys yra pusinis, ir jos vadinamos *fermijonais*. Tai reiškia, kad, mažėjant dalelių energijai, jų elgesys pradeda priklausyti nuo jų kvantinės prigimties. Šie nauji faktai padėjo atskleisti šviesos spinduliavimo mechanizmą (bei įrodyti galimybę sukurti šviesos stiprintuvus; juose pritaikius jau žinomas radiotechnikos žinias, buvo sukurti lazeriai), taip pat įsigilinti į atomų bei medžiagų vidinį pasaulį.

Kol sistemoje galioja idealiųjų dujų dėsniai, dalelių kvantinė prigimtis pasireiškia tuo, kad jų „kolektyvinį" elgesį apibūdina skirtingos pasiskirstymo funkcijos, nors kiti termodinaminiai sistemos parametrai yra vienodi. Mažėjant dalelių kinetinei energijai, pradeda reikštis jų sąveikos jėgos, todėl sistemos dalelių būsena gali iš esmės pasikeisti. Pavyzdžiui, aukštoje temperatūroje visos medžiagos gali suskilti į elektronų ir branduolių plazmą, fotonus bei plazmines bangas (plazmonus). Dar aukštesnėse temperatūrose, kurios įmanomos termobranduolinių reakcijų metu, branduoliai gali suskilti į elementariąsias daleles, o tose temperatūrose, kurios egzistavo Visatos *Didžiojo sprogimo* metu, visas mūsų pasaulis susidarė iš kvarkų-antikvarkų plazmos. Visa tai įdomios, bet kitoms temoms skirtos problemos. Mes toliau nagrinėsime vyksmus plazmai vėstant ir susidarant atomams bei kondensuotai medžiagos būsenai.

Atomai ir kvaziatomai

Kvazineutralioje plazmoje teigiamųjų ir neigiamųjų elektros krūvių kiekis vienodas, taigi visa sistema iš esmės neutrali, bet vietomis gali būti įelektrinta, nes vieno ženklo krūvių tarpusavio stūmą kompensuoja įsiterpiančio kito ženklo krūvių sąlygojama trauka. Mažėjant plazmą sudarančių dalelių energijai, ima vyrauti atskirų branduolių ir elektronų trauka, dėl kurios elektronai gali pradėti skrieti orbitomis. Tokie elektronai praranda energiją dėl spinduliavimo, vadinamo ciklotroniniu, nes kiekviena elektringoji dalelė, judėdama su pagreičiu (judėdama orbita, dalelė įgyja kampinį pagreitį), spinduliuoja šviesą, kurios energija priklauso nuo tos dalelės greičio. (Šiuo metu ypač vertinamas ištisinio spektro — nuo infraraudonosios šviesos iki Rentgeno spindulių — šviesos šaltinis yra ciklotronas, kuriame magnetinis ir kintamasis elektrinis laukai priverčia elektronus judėti norimos formos orbitomis.) Tačiau egzistuoja elektronų energijos ribinė vertė, kuri priklauso nuo branduolio krūvio ir žemiau kurios elektronas energiją gali keisti tik tam tikromis porcijomis. Sakome, kad branduolys ir elektronas (elektronai) sudaro surištąją būseną, vadinamą *atomu*, jei elektronų skaičius lygus branduolio krūviui, arba *jonu*, jei elektronų skaičius didesnis ar mažesnis už branduolio krūvį. Visa tai atskleidė A. Zomerfeldas (A. Sommerfeld) ir N. Boras (N. Bohr) dar šio šimtmečio pradžioje.



9 pav.
Elektronų būsenos Kulono potencinėje duobėje: ▬ — Kulono potencialo eiga, ········ — energijos būsenos, kuriose „telpa" sveikasis skaičius elektroninių bangų, —— — stovinčiosios elektroninės bangos atvaizdas

Kodėl elektronas gali įgauti tik tam tikras energijos vertes, buvo suprasta kiek vėliau, L. de Broiliui (L. de Broglie) atskleidus dalelių bangines savybes. (Dabar eksperimentais lengvai parodomos ne tik elektronų ar kitų elementariųjų dalelių banginės savybės, pavyzdžiui, jų difrakcija, bet visai neseniai buvo sukurtas *atominis mikroskopas*, kuriame helio atomai atlieka tą pačią funkciją, kaip šviesa optiniame mikroskope.) Kvantinės mechanikos metodais nustatyta, kad kiekviena leistina elektrono būsena atome (jone) atitinka stovinčiąją elektrono bangą branduolio sukurtame potencialiniame lauke (9 pav.).

Sferinės simetrijos lauke (kurį įtakoja ir atome esantys elektronai) gali egzistuoti skirtingos bangos, o tų bangų tipai bei jas atitinkančios elektronų būsenos apibūdinamos sutartiniais simboliais — *s, p, d, f*, ... raidėmis, kurios nurodo banginės funkcijos simetrijos tipą, bei skaičiumi, rašomu prieš minėtas raides ir nusakančiu būsenos numerį (mažesnis skaičius rodo, kad būsena yra arčiau branduolio). Suskaičiavę kiekvienos būsenos elektronus ir jų skaičių parašę prie raidės kaip laipsnio rodiklį, atomą (joną) galėsime apibūdinti tam tikra formule, pavyzdžiui, litį — $1s^2 2s^1$, alavą — $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^6 4d^{10} 5s^2 5p^2$. Toks užrašymo būdas padeda suprasti elementų savybių periodiškumą, kurį atrado D. Mendelejevas, o paaiškino H. Mozlis (H. Moseley), didžiausią vaidmenį priskirdamas branduolio krūviui. Be to, žinant skirtingų būsenų simetriją, galima pagal šią atomo formulę numatyti kai kurias optines ar magnetines atomų savybes.

Jei atomas ar jonas yra ne laisvoje erdvėje, o turi kaimynus, t. y. jis yra įterptas tarp kitų atomų, tai potencialo duobės, kurioje sutelpa branduolio pritraukti elektronai, forma priklauso jau ne tik nuo branduolio krūvio ir atomo elektronų Kulono traukos, bet ir nuo aplinkui esančių atomų. Jie pakeičia atomo „formą", be to, gali pakeisti ir prie branduolio esančių elektronų skaičių. Elektronų skaičius pakinta išoriniame, t. y. valentinių elektronų, sluoksnyje, ir yra sakoma, kad cheminės medžiagų savybės pareina nuo šių elektronų skaičiaus bei konfigūracijos. Panagrinėsime keletą pavyzdžių.

Gamtoje susidaro ar žmogaus sukuriami įvairūs atomų dariniai, kuriuose vienos rūšies atomai išsidėsto tam tikra tvarka, taip pat vienos rūšies atomą ar jų grupę supa kitos rūšies atomai arba susidaro skirtingo storio ir skirtingos rūšies atomų sluoksniai. Tokie natūralūs ar dirbtiniai dariniai skatina tyrinėti atomų tarpusavio sąveikas bei atomo apsupimo įtaką jo savybėms. Atsižvelgę į anksčiau aptartus efektus, branduolio Kulono potencialo eigą galime reguliuoti keisdami pasirinkto atomo kaimynus, be to, ją padaryti nesferiškos simetrijos. Kartais iš atomo galima „atimti" kelis elektronus, t. y. juos surišti su kitais gretimais atomais, dėl to tiesiogiai nuo branduolio priklausančių elektronų skaičius, o ir branduolį supantis elektrinis laukas pakinta. Tokie dariniai neretai vadinami *kvaziatomais*.

Kvaziatomų gali būti įvairių. Vienas iš jų — germanio ar silicio monokristalų priemaišos, kurių dėka ir atsirado mikroelektronika. Pavyzdžiui, jei legiruosime šiuos kristalus penkiavalentėmis priemaišomis, tai keturi jų elektronai sudarys jungtis su priemaišą supančiais atomais, o penktasis liks surištas tik su priemaišinio atomo branduoliu. Pastarasis elektronas elgsis labai panašiai kaip vandenilio atomo elektronas, panašus bus ir jo energijos spektras, tik šis elektronas judės beveik periodiniame kristalo lauke, o priemaišos Kulono potencialą trikdys kristalo poliarizacijos ani-

zoptropija. Todėl elektrono jonizacijos energija bus gana maža, ir jį bus nesunku (lyginant su vandenilio atomo elektronu) išlaisvinti. Panašiai elgtųsi ir trivalentės priemaišos, tik jų įterpus susidarytų „antivandenilio" kvaziatomas, kurio centre būtų efektinis neigiamas branduolys, o prie jo — teigiamojo krūvio „perteklius" (nes šios priemaišos aplinkoje trūksta, palyginti su aplinkui esančiais atomais, elektrono), vadinamas *skylute*, turinčia teigiamą krūvį.

Kitas pavyzdys — įvairios pereinamųjų metalų ar retųjų žemių priemaišos kristaluose ar net stikluose. Šių priemaišų energijos lygmenų sandara panaši į laisvo atomo, tik kristalo vidinis laukas sąlygoja būsenų simetrijos, o kartais ir jų užpildymo kitimą. Tačiau elektronų šuoliai tarp lygmenų vyksta labai panašiai, kaip ir laisvuose atomuose. Plačiausiai domimasi tais atomais, kurie, elektronams peršokant, išspinduliuoja šviesą. Tokių atomų yra liuminoforuose, naudojamuose kineskopų ekranams padengti (pvz., europis), taip pat kietojo kūno lazerių kristaluose (pavyzdžiui, chromas — rubino, t. y. Al_2O_3, kristaluose, neodimis, titanas — aliuminio-itrio granato kristaluose).

Ši kristalo geometrinių požymių įtaka atomų savybėms yra didelė, tačiau, ypač paskutiniame pavyzdyje, svarbiausias sistemos parametras — atomo vieta periodinėje atomų lentelėje, cheminė prigimtis. „Vandenilinių" priemaišų savybės mažai priklauso nuo jų cheminės prigimties, nes priemaišinis atomas yra paverčiamas vienvalenčiu, kurio potencialas artimas Kulono potencialui. Visai neseniai nustatyta, kad tokio pat vandenilinio tipo būsenos galimos ir apie neigiamai įelektrintą pereinamojo metalo priemaišą, kuri pati elgiasi kaip kvaziatomas. Tai reiškia, kad šias būsenas sąlygoja ne priemaišos prigimtis, o potencialinio barjero pavidalas.

Elektronas potencialo duobėje

Kvantinės mechanikos atradimai tyrinėjant atomo teoriją dar ketvirtajame šio amžiaus dešimtmetyje paskatino nagrinėti įvairiausias situacijas, kuriose galėtų atsirasti elektronai. Kai kurie tada surasti principiniai sprendimai dabar susilaukė pakartotino dėmesio. Anksčiau tai buvo daroma kvantinės mechanikos aparatui tobulinti ir jos dėsningumams atskleisti, o dabar, įvaldžius medžiagų inžineriją, tokius darinius galima pagaminti ir taip realizuoti teorinius sumanymus.

Atomams sąveikaujant, cheminio (dėl elektronų persiskirstymo tarp atomų) ar fizikinio (dėl atomų poliarizacijos bei sąveikos ekranavimo) ryšio ypatumų dėka gali susidaryti įvairūs atomų, jonų ar molekulių kristalai.

(Dažniausiai cheminė ryšio forma neskiriama nuo fizikinės, o abi vadinamos cheminiu ryšiu, nors tai ir nėra tikslu.) Šių kristalų energijos spektrai skiriasi nuo atomo spektro tuo, kad dėl periodinio atomų išsidėstymo sąveikaujančių būsenų energijos lygmenys išplinta, o kartais suskyla į juostas. Jos gali būti užpildytos, tuščios ar iš dalies užpildytos.

Jei juostoje yra daug laisvųjų elektronų, stipriai sąveikaujančių tarpusavyje, tai tokia medžiaga (vadinama *metalu* ar *pusmetaliu* priklausomai nuo krūvininkų koncentracijos) yra labai panaši į straipsnio pradžioje minėtą plazmą, tik ji yra ne dujinė, o kieta. Metalai daugiausia žinomi kaip elektros ir šilumos laidininkai bei medžiagos, turinčios „metalinį" blizgesį. Pastarąją savybę lemia šviesos atspindys nuo plazmos. Elektromagnetinių bangų sklidimas tokia medžiaga ar jos aplinkoje priklauso nuo plazmos savybių (o jas kartais nesudėtinga valdyti elektriniais ir magnetiniais laukais bei medžiagą legiruojant), ir tai suteikia galimybių įvairioms radioelektronikos šakoms. Gali būti sukurti ir „nekasdienės" elektrotechnikos prietaisai, pavyzdžiui, transformatoriai, perduodantys energiją tik viena kryptimi. Visa tai aiškina savita fizikos kryptis — elektrodinamika, kurios pagrindus sukūrė Dž. Maksvelas (J. Maxwell), suformuluodamas svarbiausias jos lygtis, vadinamas jo pavarde.

Medžiagos, kuriose užpildytos ir tuščios juostos nepersikloja, vadinamos nelaidininkais (kartais — dielektrikais ar izoliatoriais) ar puslaidininkiais. Skirtumas tarp jų labiau susijęs su jų taikymu, o ne su jose vykstančiais procesais. Tokių medžiagų savybės priklauso nuo jas sudarančių ir priemaišinių atomų. Elektrinės ir optinės tų medžiagų savybės gana sėkmingai prognozuojamos ar suprantamos žinant cheminės jungties konfigūraciją ir medžiagų sudėtį. Medžiagos elektrinį laidumą galima valdyti „vandenilinėmis" priemaišomis. Jau minėjome, jog tokių priemaišinių atomų jonizacijos energija labai sumažėja, todėl net žemoje temperatūroje atomas atiduoda elektroną į laidumo juostą (ši priemaiša vadinama *donoru*), o „antivandenilio" kvaziatomas pasiima elektroną iš valentinės juostos, ten sukurdamas skylutę (vadinamas *akceptoriumi*). Kintant priemaišų koncentracijai, kinta laisvųjų krūvininkų koncentracija, kartu ir elektrinis medžiagos laidumas. Tačiau daug metų buvo akivaizdi, bet nesuprantama kitų kristalo defektų (savitųjų defektų — kai kristalą sudarantis atomas yra ne savo vietoje, paviršiaus defektų bei kai kurių mikronehomogeniškumų) įtaka jų savybėms ir pačių defektų energinė struktūra.

Problemos sprendimo metmenys buvo sukurti parodžius, kad kristalo periodiškumo trūkis yra pakankama priežastis naujiems energijos lygmenims atsirasti, o to trūkio konfigūracija nusako šių naujų būsenų elektronų savybes. Tokie lygmenys gali išsiskirti leistinosiose ar atsirasti draustinėse

juostose. Ypač pastarieji aktyviai veikia medžiagų savybes, nes tarpinės būsenos tarp leistinųjų juostų labai palengvina medžiagos energijos mainus.

Potencialo duobės pavidalas ar potencialo eiga dviejų medžiagų sandūroje (taip pat ir laisvo paviršiaus aplinkoje) labai priklauso nuo atomų sąveikos ir lokalinės deformacijos, nes atomus veikiančios jėgos yra nesimetriškos. Didelė pažanga šioje srityje padaryta išradus naujus didelę skiriamąją gebą turinčius prietaisus — peršviečiantį elektroninį ir tunelinį mikroskopus, kuriais galima nustatyti pavienių atomų išsidėstymo tvarką ir pamatyti, kaip kristalo deformacija nyksta susidarant naujiems defektams. Be to, deformacijos sukelti laukai sąlygoja priemaišinių atomų ir kitų defektų persiskirstymą, todėl tai, kas teoriniame modelyje aproksimuojama tam tikros formos potencialo duobe, realybėje yra gana sudėtinga sandara.

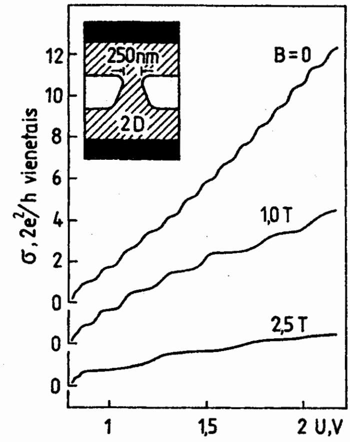
Norint valdyti medžiagos savybes, reikia suprasti kristalo defektų atsiradimo ir jų keitimo bei įtakos galimybes, o tai sudaro jau turinčių ilgametes tradicijas medžiagotyros mokslo ir praktikos esmę. Suvokus defektų persitvarkymo mechanizmus, paaiškėjo, kaip išvengti tų defektų įtakos. Vienas iš populiariausių būdų — tai plonų įvairių medžiagų sluoksnių auginimas. Jie yra tokio plonumo, kad, veikiant gardelės deformacijai, neatsirastų defektų, taip pat kad elektronai viename sluoksnyje „jaustų" kitame panašiame sluoksnyje esančias būsenas. Kelių atomų sluoksnis, apsuptas kitos medžiagos, yra gana ideali potencialo duobė, kurios matmenys sąlygoja elektronų energijos lygmenis.

Jei elektronus, esančius tokioje duobėje, sužadinsime ar kitu būdu pakeisime lygmenų užpildymą, tai galėsime sukelti šviesos spinduliavimą bei jos stiprinimą. „Ploną" barjerinę sandarą ribojantis sluoksnis yra sudaromas iš tokios medžiagos, o jos storis parenkamas toks, kad ja galėtų sklisti spinduliuojama šviesa. Tačiau kad ji sklistų kryptingai ir su minimaliais nuostoliais, šis ribojantis sluoksnis apgaubiamas kitu, kurio šviesos lūžio rodiklis yra mažesnis už vidinio sluoksnio. Jei šviesa stiprinama ir gaunamas teigiamas grįžtamasis ryšys, turime *heterolazerį* („hetero" nusako, kad lazeris sudarytas iš medžiagų, turinčių skirtingas draustinių energijų juostas) — optinį elektroninį prietaisą, sėkmingai taikomą elektros energijai versti šviesa, taip pat ir optinėse ryšių sistemose, medicininiuose lazeriniuose skalpeliuose.

Jei greta vienos „plonos" barjerinės sandaros pagaminsime tokią pačią kitą (ar daugelį jų), tai galėsime priversti elektronus peršokti iš vieno barjero lygmenų į kito barjero lygmenis, taip pat, kiek pakeitę potencialų tarp barjerų skirtumus, šiuos šuolius ir uždrausti. Tokių lygmenų rezonansinės savybės atvėrė naujas galimybes puslaidininkinei elektronikai, buvo

sukurti nauji greitaveikiai prietaisai ir tik dėka to, kad sugebėta užauginti tokio storio medžiagos sluoksnius, kuriuose „telpa" tik tam tikri elektronai.

Visai nauji procesai vyksta tokioje sandaroje verčiant elektronus judėti tokio „plono" sluoksnio plokštumoje, t. y. erdvėje, kurioje judėjimas viena kryptimi neleidžiamas. Tai dvidimensinės sandaros, dažnai žymimos 2D simboliu. Jei tokiame sluoksnyje sudarysime taškinį kontaktą, t. y. siaurus „vartus", pro kuriuos gali tekėti srovė, tai elektrinis laidumas σ, didėjant potencialų skirtumui *U*, didės šuoliais, o šuolio dydis priklausys ne nuo medžiagos, o tik nuo pagrindinių konstantų: $2e^2/h$, čia e — elektrono krūvis, h — Planko konstanta (10 pav.). Taigi elektronai visai „pamirš" medžiagos, kurioje jie yra, savybes.

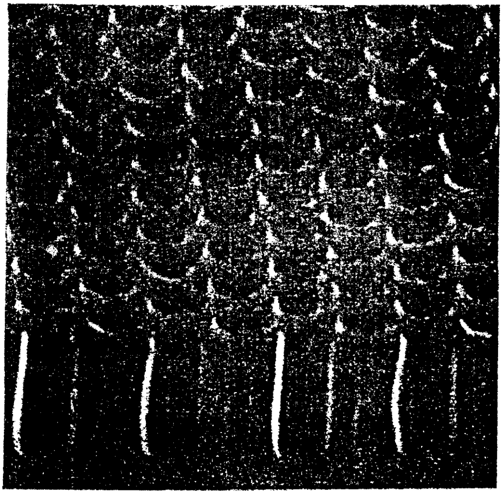


10 pav.
Dvimačio taškinio kontakto elektrinio laidumo priklausomybė nuo potencialų skirtumo skirtingame magnetiniame lauke. Intarpe — bandinio principinė schema: balta zona — kontaktai, subrūkšniuota zona — 2D medžiagos sluoksnis

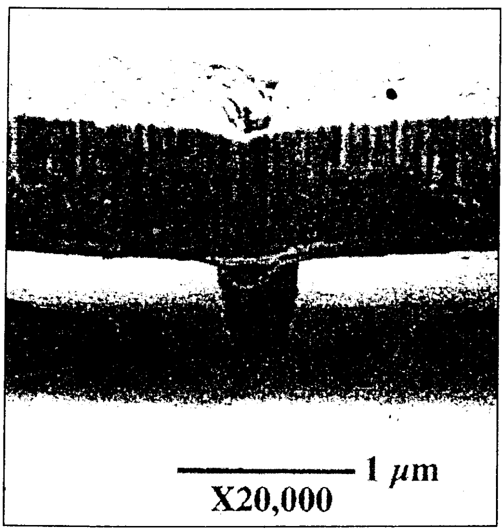
Aišku, toks elektronų judėjimas galimas tik tada, jei nekreipiama dėmesio į elektronų sklaidą. Jis vadinamas *balistiniu.* Kadangi elektronas turi elektros krūvį, tai jo trajektoriją gali keisti elektriniai ir magnetiniai laukai. Todėl, sudarius tam tikros konfigūracijos elektrinius laukus, elektronų pluoštus galima fokusuoti, o veikiant magnetiniu lauku, — nukreipti norima kryptimi, jei laidininkas yra kryžiaus formos, taip pat ir lokalizuoti tam sukurtose dvidimensinėse ertmėse. Tai reiškia, kad, apribodami elektrono kelią dvimatėje struktūroje, t. y. sukurdami tam tikros konfigūracijos vienmatę erdvę, iš esmės pakeičiame elektronų judėjimo dėsningumus.

Jau sukurtos įvairios elektronų bangolaidinės sistemos, kuriose elektronai elgiasi kaip šviesa, t. y. kaip elektromagnetinės bangos. Visa tai įgalino sukurti ypač mažais, net vieno elektrono krūvio dydžio, signalais valdomus prietaisus. Tiesa, kol kas jie veikia tik labai žemos temperatūros sąlygomis.

Galima priversti atomus išsidėstyti nedidelėmis grupėmis, pavyzdžiui, tokiomis, kurių matmenys būtų palyginami su elektrono bangos ilgiu. Šie atomų dariniai vadinami *klasteriais*. Kadangi elektronas juose judėti negali, tai tokios sandaros vadinamos nulmatėmis (0D). Jose, kaip ir straipsnio pradžioje aprašytuose atomuose, elektronų būsenas sąlygoja potencialo eiga erdvėje. Jei toks klasteris sudarytas kitoje medžiagoje, tai šiokios tokios įtakos turi ir jį supančios medžiagos savybės, tačiau svarbiausi yra klas-



a)



b)

11 pav.
Fotoninės tuščiavidurių cilindrų gardelės (*a*) ir tunelinio prietaiso submikroninio kontakto (*b*) elektroninės nuotraukos. Cilindro skersmuo — 245 nm, gylis— 0,65 mm

terio matmenys. Tokius klasterius galima sukurti atplėšiant atomų grupes iš medžiagos, pavyzdžiui, ją veikiant intensyviais jonų, elektronų ar šviesos pluoštais vakuume (todėl jų savybėmis labai domisi astrofizikai, tiriantys tarpžvaigždinę erdvę), galima litografiniu būdu suformuoti juos kristalo paviršiuje 2D sandaroje (11 pav.) arba sudaryti ir kondensuotoje terpėje.

Klasikinis pavyzdys – spalvoto stiklo virimas. Įterpiant į stiklą kai kurių medžiagų, pavyzdžiui, kadmio sulfido ar selenido, jame susidaro šių medžiagų kristalai, nuspalvinantys stiklą geltona ar tamsiai raudona spalva. Jei verdamą stiklą intensyviai maišysime, tai susidarys mažesni kristalai. Pasiekus dydį, prilygstantį elektrono bangos ilgiui, kristalito būsenos pradeda keistis, vis mažesnis elektronų skaičius gali jame tilpti, ir todėl liekančios būsenos tolsta viena nuo kitos (energijų erdvėje). Keičiasi kristalitų šviesos laidumo spektras, o stiklas, sumažėjus kristalitams, gali savo spalvą pakeisti iš raudonos į geltoną, o dar labiau juos sumažinus — net ir į žydrą. Vėl matome, kaip geometrinis veiksnys įtakoja medžiagos elektronų savybes.

Pabaiga

Pateikta medžiagos savybių priklausomybė nuo ją sudarančių dalelių išsidėstymo rodo, kad iš tikrųjų turime tris būdingas medžiagos būsenas: didžiausius mikropasaulio atstovus atomus (mažesnės yra elementariosios dalelės ir jų kompleksai), kristalus bei kitokias makroskopines sandaras, kurių savybės nepriklauso nuo kūno matmenų, taip pat mezoskopinius (tarpinius) objektus, kurių savybės priklauso tiek nuo ryšių tarp atomų, tiek ir nuo geometrinių parametrų. Pastariesiems galima priskirti ir molekules, nors jų savybių negalime „valdyti", o tik jas pakeičiame perkeldami molekules ant kitos medžiagos paviršiaus. Aišku, ryškiausi šio mezoskopinio pasaulio objektai — dirbtiniai dariniai, kuriuose elektronų judėjimą ir lokalizaciją sąlygoja pats darinys. Kadangi atomų išsidėstymas priklauso nuo darinio gamintojo norų, o dabartinė sluoksnių dengimo technologija leidžia valdyti kiekvieną atomų sluoksnį, tai ši medžiagų mokslo dalis vadinama medžiagų inžinerija (konstravimu). Šios mokslų krypties plėtojimasis atskleidė ir kelias fundamentalias tiesas, kurių atradėjams buvo suteiktos Nobelio premijos — tai L. Esakiui (L. Esaki) už supergardelių sukūrimą, K. fon Klitzingui už kvantinio Holo efekto atradimą, P. G. Genesui (P. G. Gennes) — už geometrinių veiksnių įtaką cheminėms reakcijoms.

Vilniaus fizikai straipsnyje nagrinėjamas problemas analizuoja keliais skirtingais aspektais.

Bene seniausiai pradėti įvairių defektų energijos spektro ir elektronų bei fotonų sąveikos su jais tyrimai. Vilniaus universitete, be daugelio rezultatų, nustatyta, kad defektai sudaro tam tikras specifines struktūras, kurios sąlygoja medžiagos optines bei elektrines savybes. Taip pat tyrinėjami įvairūs metastabilūs centrų kompleksai, turintys daug reikšmės nagrinėjant labai nuo termodinaminės būsenos nutolusių sistemų savybes. Tarp jų — ir vadinamoji „chaoso" problema, kai, sužadinant sistemą, iš netvarkos gimsta nauja tvarka. Tokia gali būti laisva dėsnio, kurį suformulavo D. Prigožinas (D. Prigogine), interpretacija (o už šio dėsnio pagrindimą jam buvo taip pat suteikta Nobelio premija). Svarbiausias defektų tyrimų rezultatas — tai įrodymas, kad lokaliniai lygmenys sąlygoja kai kuriuos šviesos netiesinės absorbcijos efektus.

Kita tiek Vilniaus universiteto, tiek Puslaidininkių fizikos instituto šios srities darbų kryptis, leidžianti pažvelgti į mezoskopinį pasaulį, — tai elektronų rekombinacijos ir difuzijos dvimatėse bei nulmatėse sandarose tyrimai. Šie darbai atliekami todėl, kad, turint pakankamai modernią liuminescencijos, pikosekundinės spektroskopijos, šviesa indukuotos difrakcijos ir mikrobanginių tyrimų aparatūrą, intensyviai bendradarbiaujama su tomis laboratorijomis, kuriose tokios sandaros yra sukuriamos.

Ir trečia darbų kryptis, siekianti mezoskopinio pasaulio slenkstį, — tai balistinio elektronų transporto tyrinėjimai, išplėtoti nagrinėjant karštų elektronų efektus kristaluose. Pastaruoju metu jie tiriami ir dvimatėse struktūrose. Šie tyrimai atliekami Puslaidininkių fizikos institute, kuriame įvaldoma ir tokių sandarų gamybos technologija.

Šiuo metu Vilniaus universiteto Medžiagotyros ir taikomųjų mokslų institute pradėtos nagrinėti galimybės valdyti medžiagų savybes, sudarant lazeriniu garinimu kristalų paviršiuje kelių atominių sluoksnių laiptelius ir jų aplinkoje auginant mezoskopinius kitos medžiagos darinius. Tokie dariniai turi keisti medžiagos paviršiaus chemines (ir katalitines) savybes, o šių sluoksnių optinės ir elektrinės savybės — labai priklausyti nuo gamintojo norų.

Reziumuojant galima tik pabrėžti, kad, tiriant įvairias sandaras, randama būdų, kaip valdyti medžiagų savybes ir kartu kurti unikalių savybių turinčius prietaisus. O kaip matyti iš pateiktos šios mokslo krypties istorijos apžvalgos, naujoms idėjoms realizuoti turime plačias galimybes; atsiranda naujos mokslo ir technologijos kryptys: mezoskopinė fizika, medžiagų inžinerija, nanoelektronika ir nanotechnologija, kuriose daug ką sukurs ir šio straipsnio skaitytojų karta.

Medžiagotyros ir taikomųjų mokslų ir Puslaidininkių fizikos institutai įsiliejo į Europos naujos technologijos elektronikos kūrimo tinklą PHANTOMS (Physics and technology of mesoscopic systems — Mezoskopinių sistemų fizika ir technologija), o tai reiškia, kad dirbama glaudžiai bendradarbiaujant su kitais geriausią šiuolaikinę techniką turinčiais centrais ir kad jaunimui į juos kelias atviras.

ARŪNAS KROTKUS

FOTONIKA GRETA MŪSŲ

Pradėsiu, kaip tai dabar darosi madinga, iš tolo ir nuo labai bendrų dalykų. Kartą netyčia man į rankas pateko nesenas žurnalo „Time" numeris su Amerikos menedžmento „guru" (išminčiaus, mokytojo) Peterio Drukerio (Peter Drucker) interviu. Svarbiausiu ateinančiojo, dvidešimt pirmojo, šimtmečio bruožu jis laiko tai, jog to laikotarpio visuomenės narių padėtį ir sėkmę lems ne apsukrumas ar įžūlumas, o vien profesionalumas ir žinios. Toje postindustrinėje, postbiznio visuomenėje net ir trumpalaikis informacijos monopolis — sėkmingo biznio laidas dabar — taps neįmanomas dėl viską apimančio kompiuterizavimo, o mokslo žinios, į kurias dar dažnai težiūrima tik kaip į kokį blizgutį, puošiantį visuomenę, bet nelabai būtiną, taps didžiausiu kiekvienos valstybės turtu.

Kai girdžiu dešimtokus kažkur nuo Raseinių postringaujančius per radiją apie tai, kokia nuobodi ir visiškai nereikalinga algebra ar fizika, aš pradedu labai abejoti, ar gali Lietuva tapti tos naujosios visuomenės lygiateise nare.

Bet šiandien pagrindinis mūsų krašto privalumas yra tas, kad turime nemažai išsilavinusių žmonių. Ne filosofų, ne ekonomistų — jų sovietmečiu nei buvo, nei galėjo būti, — o inžinierių, matematikų, fizikų. Kai aš ir mano bendraamžiai rinkomės fiziką savo gyvenimo tikslu, žinojome, kad tai yra viena iš nedaugelio specialybių, kurią įgiję, galėsime bent jau savo žiniomis prilygti Šeklio ar Bradberio herojams. Ir bendraudami su tais nedaugeliu į mūsų kraštus užklydusių kolegų iš Vakarų Europos universitetinių miestelių, niekada nesijautėme niekuo už juos prastesni. Net ir apranga: nudryžęs megztinis ir aptrinti džinsai buvo lyg pasaulinė jaunų technokratų uniforma. Nejaugi dabar ateinančios kartos idealu taps treninguoti Gariūnų prekijai ar nepriekaištingai apsirengę ir sklandžiai, bet be jokios gilesnės minties postringaujantys valdininkėliai? Nejaugi ištuštės tiksliųjų mokslų fakultetų auditorijos ir nebebus kam palydėti į tradicinę metų kelionę per Vilniaus miestą fizikų dienos Dinozaurą?

Reiktų pradėti suprasti, jog fizikos ir matematikos žinios šiuolaikinėje visuomenėje turi būti taip pat svarbios ir visiems privalomos, kaip asmens higienos taisyklės. Pradėkime nuo mažo: aš parašysiu šį straipsnį — jūs jį perskaitysite; visi po to išmanysime truputį daugiau.

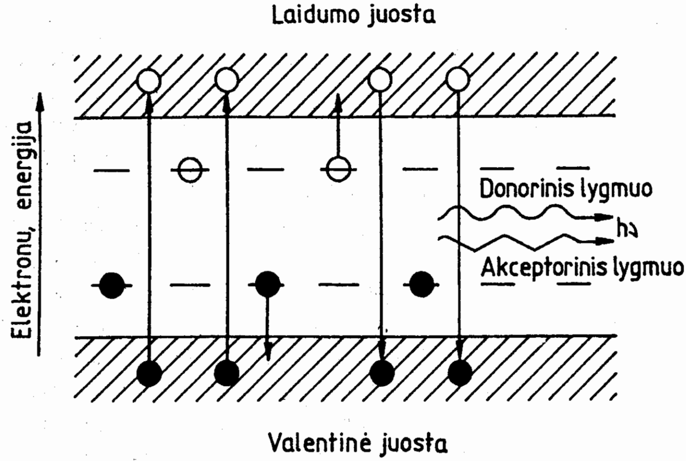
Papasakosiu apie keletą prietaisų, kuriuos kiekvienas, turintis pinigų (bet daug!), gali įsigyti parduotuvėse. Pagaminti Japonijoje, JAV ar Honkonge, visi jie turi vieną bendrą bruožą — juose įkūnyta nauja, irgi iš XXI amžiaus, technologija — fotonika. Šis žodis sudarytas pagal žodį „elektronika", kuris visiems gerai suprantamas, reiškia ir rodo, jog tuose prietaisuose fotonai — elementariosios dalelės, kurios sudaro šviesos spindulius, — atlieka tokias pačias funkcijas, kaip elektroniniuose prietaisuose elektronai. Kaip elektroniniuose prietaisuose elektros srovė, taip fotoniniuose šviesos spindulys generuojamas, perduodamas ir registruojamas. Panašūs ne tik pavadinimai. Ir vienose, ir kitose technologijose naudojami elementai, pagaminti iš tos pačios rūšies medžiagų — puslaidininkinių kristalų. Ši aplinkybė leido fotonikai nusikopijuoti daugelį elektronikoje ištobulintų technologinių metodų ir procesų, būtent dėl to fotoniniai prietaisai dabar niekuo nenusileidžia elektroniniams, o kartais juos ir pralenkia.

Distancinis TV valdymas

Informacijos perdavimas šviesos signalais nėra toli gražu nei labai nauja, nei itin originali idėja. Dar mūsų protėviai pranešdavo vieni kitiems apie neprašytų svečių — kryžiuočių — užpuolimus, degindami laužus ant aukštesnių kalvų ar piliakalnių.

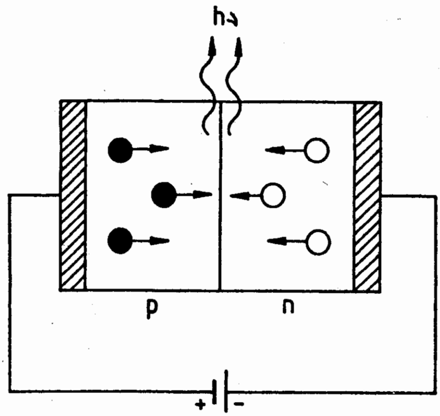
Šiuolaikinius standartus atitinkantis informacijos perdavimas ištobulintas tik gana neseniai, kai buvo sukurti kompaktiški ir patikimi puslaidininkiniai šviesos šaltiniai bei imtuvai. Anot kvantinės spinduliavimo teorijos, šviesos kvantas — fotonas — atsiranda elektronui medžiagos atome peršokus iš vieno kvantinio lygmens į kitą, turintį mažesnę energiją. Vykstant atvirkščiam procesui — šviesos kvanto sugerčiai (absorbcijai), — elektronas pereina iš žemesniojo energijos lygmens į aukštesnįjį.

Dauguma stebuklingų puslaidininkių savybių atsirado dėl to, jog šiose medžiagose energijos spektrą sudaro ne lygmenys, o labai artimų lygmenų grupės, vadinamos energijos juostomis (12 pav.) Svarbiausios iš jų yra dvi: aukštesnioji, arba laidumo, ir žemesnioji, valentinė. Jas skiria draustinių energijų juosta, kurioje energijos lygmenis galima sukurti tik įterpus į puslaidininkinį kristalą kokios nors kitokios medžiagos atomų (priemaišų). Priemaišiniai atomai skirstomi į dvi rūšis. Arčiau laidumo juostos esantys donoriniai lygmenys teikia elektronus laidumo juostai, kuri gryname puslaidininkyje šiaip jau yra beveik tuščia; arčiau valentinės juostos esantys akceptoriniai lygmenys priima elektronus iš šios zonos, kartu sukurdami pilnoje valentinėje juostoje tuščias vietas (skylutes), kurios vėliau elgiasi kaip laisvi teigiamo ženklo krūvininkai.



12 pav.
Elektronų energijos spektras puslaidininkyje
Elektronams „leista" turėti energijos, atitinkančios subrūkšniuotas paveikslėlio vietas, vadinamas laidumo ir valentine juostomis. O tarp jų — draustinių energijų juostoje — yra tik nedaugelis priemaišinių lygmenų. Šviesą sugėrusios medžiagos elektronas peršoka iš valentinės juostos į laidumo juostą, todėl valentinėje atsiranda lygmuo be elektrono — skylutė. Atvirkštinį šuolį lydi išspinduliuojamas šviesos kvantas, kurio energija *h*ν yra beveik lygi draustinių energijų juostos tarpui.

13 pav.
Puslaidininkinių šviesos šaltinių veikimo principas
Jis pagrįstas elektronų ir skylučių rekombinacija laidžiąja kryptimi įjungtoje *pn* sandūroje. Šią sandūrą sudaro puslaidininkio kristalas, kurio viena dalis (*p*) legiruota akceptorinėmis priemaišomis, o kita (*n*) — donorinėmis. Prijungtos įtampos poliškumas yra toks, jog ir skylutės *p* srityje, ir elektronai *n* srityje juda sandūros link. Todėl ant šių sričių ribos intensyviai rekombinuoja elektronai ir skylutės ir išspinduliuojami šviesos kvantai.

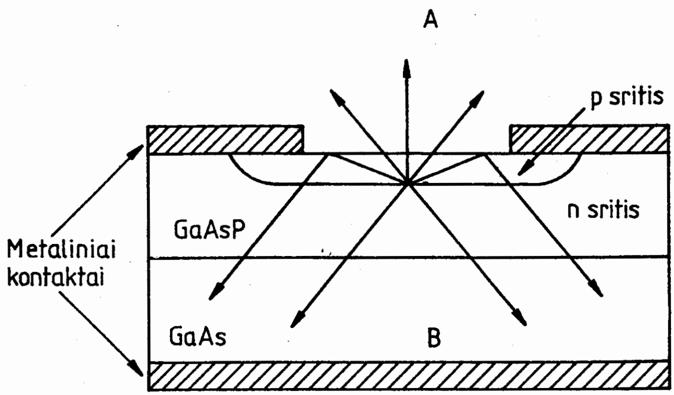


Kad puslaidininkinis prietaisas imtų skleisti šviesos spindulius, toje pačioje prietaiso srityje vienu metu turi būti daug elektronų laidumo juostoje ir mažai (arba daug skylučių) — valentinėje juostoje. Tokias sąlygas paprasčiausia sukurti *pn* sandūroje — ant donorais ar akceptoriais legiruotų puslaidininkinio kristalo sričių ribos. Prijungus prie tokios sandūros elektros srovės šaltinį (13 pav.), elektronai ir skylutės ims judėti priešpriešiais, o ant tos dviejų sričių ribos susidarys juostų užpildymo inversija, būtina

šviesos kvantams generuoti. Šitaip puslaidininkiniai šviesos šaltiniai ir veikia: elektros srovė gabena elektronus ir skylutes link *pn* sandūros, kurioje šie krūvininkai poromis išnyksta (rekombinuoja), išspinduliuodami šviesos kvantus; jų energija šiek tiek didesnė nei draustinių energijų juostos tarpas.

Paprasčiausias toks šviesos šaltinis yra vadinamas šviesos diodu. Jo sandarą lengva suprasti pasižiūrėjus į 14 paveiksle parodytą skersinį pjūvį. Paprastai šviesos diodo struktūrą sudaro keletas įvairių puslaidininkinių medžiagų sluoksnių. Spinduliuojamos šviesos bangos ilgis priklauso nuo draustinių energijų juostos dydžio tame sluoksnyje, kuriame yra *pn* sandūra. Žaliai šviečiantys šviesos diodai, kurie buvo naudojami kai kurių senesnių kalkuliatorių indikatoriniuose tablo, pagaminti iš galio arsenido ir galio fosfido lydinio; raudonai šviečia GaAlAs šviesos diodai. Pastarųjų elementų spindulių spalvą galima gana plačiai keisti keičiant galio ir aliuminio santykį lydinyje. Kai galio daugėja, šviesos diodas ima spinduliuoti infraraudonuosius, nematomus mūsų akiai spindulius. Šie nepastebimieji talkininkai dirba nemažai reikalingų darbų. Kadangi jau užėjome į parduotuvę, tai pakalbėkime apie darbą, kurį atlieka apsunkęs po dienos rūpesčių pilietis, įsmukęs į minkštą fotelį prieš japonišką TV aparatą.

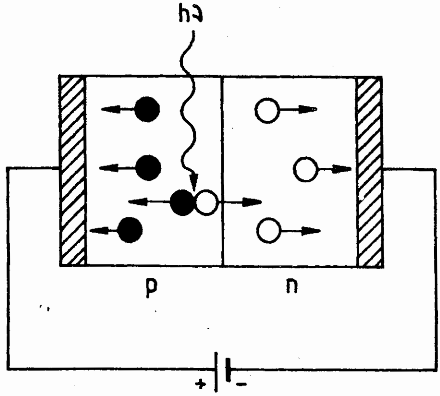
Pilietis laiko rankoje mažą dėžutę, spaudinėja jos šone įtaisytus mygtukus, taip perjungdamas kanalus ir keisdamas garso stiprį. Dėžutėje yra pora šviesos diodų, baterija „Krona" ir šiek tiek elektronikos. Ta elektroninė schema skiriama generuoti įvairioms impulsų sekoms spaudžiant skirtingus mygtukus. Elektriniai impulsai patenka į šviesos diodus, kurie



14 pav.
Šviesos diodas
Jo *pn* sandūra yra suformuota GaAsP sluoksnyje, todėl spinduliuojama žalia šviesa. Šis sluoksnis yra užaugintas ant padėklo iš galio arsenido, kurio draustinių energijų juostos tarpas mažesnis nei GaAsP, todėl šviesos kvantai (*B*), sklindantys padėklo link, yra jame sugeriami. Kita kvantų dalis (*A*) išspinduliuojama iš šviesos diodo.

išspinduliuoja atitinkamas infraraudonojo spinduliavimo impulsų sekas, patenkančias į televizorių. Čia jos priimamos ir vėl paverčiamos elektriniais impulsais, kurie jau valdo kanalų selektorių ir kitas aparato grandines.

Senesnės modifikacijos televizorius šiuos infraraudonuosius impulsus junta ne daugiau kaip, sakykim, paprasčiausia šiukšlių dėžė. Norint aparatą padaryti protingesnį, reikia atskiros schemos, kurios pagrindinė dalis yra puslaidininkinis fotoimtuvas. Todėl, naudodamasis proga, trumpai papasakosiu, kaip veikia šis fotonikos elementas.



15 pav.
Fotodiodas

Šį prietaisą sudaro *pn* sandūra, įjungta užtvarine kryptimi. Esant tokiam išorinės įtampos poliškumui, ir elektronai, ir skylutės yra traukiami tolyn nuo *pn* sandūros, todėl ant dviejų puslaidininkio sričių ribos varža labai padidėja ir elektros srovė grandine neteka. Apšvietus sandūrą šviesa, kurios kvanto energija pakankamai didelė, kad sukurtų elektronų ir skylutės porą, sandūroje generuojami krūvininkai sukelia stiprų elektros srovės padidėjimą.

Dažniausiai naudojamo puslaidininkinio fotoimtuvo — fotodiodo — veikimo schema (15 pav.) skiriasi nuo šviesos šaltinių veikimo schemos (13 pav.) tik viena smulkia detale: juose įjungtų išorinių elektros šaltinių poliškumas yra priešingas. Tačiau puslaidininkiniam diodui su *pn* sandūra ši detalė yra labai svarbi; tokio poliškumo elektrinis laukas stumia elektronus donorais legiruotoje *n* srityje ir skylutes antrojoje diodo srityje tolyn nuo sandūros, todėl pačioje sandūroje susikuria labai stiprus elektrinis laukas ir labai didelė varža. Dėl šios priežasties tokia, vadinamąja užtvarine, kryptimi per diodą teka tik labai silpna elektros srovė.

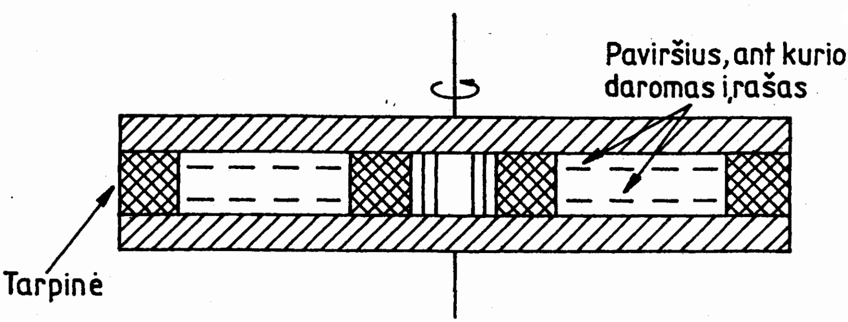
Apšvietus fotodiodą kvantais, kurių energija šiek tiek didesnė nei draustinių energijų tarpas, dauguma jų absorbuojami puslaidininkyje, tuo sukuriant elektronų ir skylučių poras. Jei tos poros sukuriamos *pn* sandūros srityje, tai diodo apšvietimas gali stipriai pakeisti per jį tekančios elektros srovės dydį. Ta srovė keičiasi kintant šviesos srautui ir taikoma šviesos signalui iššifruoti.

Šviesos diodo ir fotodiodo pora, dar dažnai vadinama tiesiog optine pora, naudojama šimtuose įvairiausių fotoninių sistemų įvairiems dydžiams tiksliai matuoti, detalėms gamyklų konvejeriuose rūšiuoti, apsaugos nuo vagių sistemose ir t.t.

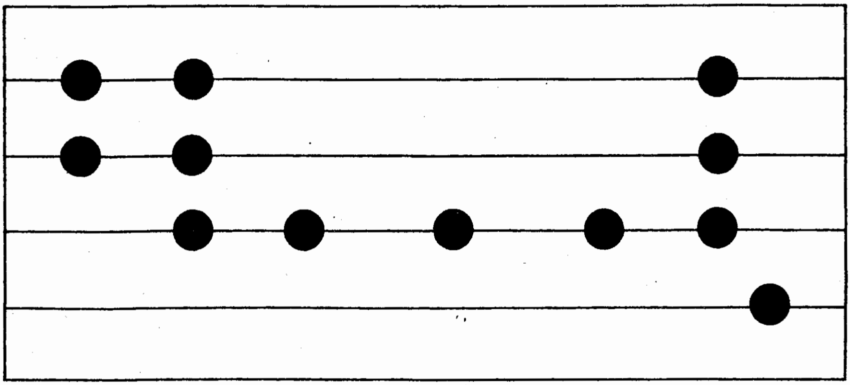
Kompaktinių diskų grotuvas

Kiekvienas melomanas žino, jog tobuliausiai atkuriamas į lazerinį arba kompaktinį diską įrašytas muzikinis įrašas. Tiesą sakant, lazerinius diskus kūrė ne muzikiniams, o vaizdo įrašams. Pirmą vaizdo diską dar 1980 metais sukūrė olandų firma „Philips". Normalios plokštelės dydžio disko kiekvienoje pusėje galima buvo įrašyti pusės valandos trukmės spalvotosios televizijos programą. Tačiau vaizdo diskai turėjo grėsmingą varžovą — vaizdo juostą, kurios pagrindinis pranašumas — galimybė įrašinėti programas namų sąlygomis. Vaizdo magnetofonai pasirodė esą gyvybingesni rinkoje, todėl lazerinių diskų kūrėjams teko ieškoti kitų taikymo sričių. Taip buvo sumanytas kompaktinių diskų grotuvas.

Muzikinio kompaktinio disko skersmuo — tik 11,5 cm. Vienoje jo pusėje galima užrašyti melodijas, skambančias net dvi valandas (ši trukmė parduodamuose diskuose kiek sumažinta dėl grynai komercinių priežasčių). Paties disko konstrukcija vaizduojama 16 paveiksle. Diską sudaro dvi skaidrios plokštelės, ant kurių vidinių paviršių ir daromas įrašas. Įrašo pavyzdys parodytas 17 paveiksle. Horizontalios linijos vadinamos profiliuotu takeliu. Jame galingu helio-kadmio lazerio spinduliu išmušamos duobutės (jų skersmuo svyruoja tarp pusės ir vieno mikrometro), kuriomis užrašomas į impulsinį kodą paverstas muzikinis kūrinys. Atstumas tarp takelių yra apie vieną mikrometrą, todėl vienoje milimetro pločio juostelėje telpa net 1000 linijų. Tas linijas galima įžiūrėti tik pro elektroninį mikroskopą, o pakeltas prieš šviesą kompaktinis diskas suspindi visomis vaivorykštės spalvomis dėl atspindėtos šviesos interferencijos. Garso įrašo kokybė unikali dėl to, kad jo negali įtakoti jokie išorinio disko paviršiaus pažeidimai, kuriems tokios jautrios įprastinės plokštelės. Diske įrašytas muzikinis kūrinys atkuriamas leidžiant išilgai profiliuoto takelio šviesos



16 pav.
Lazerinio disko konstrukcija
Muzikos ar vaizdo įrašas yra užrašomas ant vidinių skaidrių plokštelių paviršių. Juos apsaugo gerai išdžiovintos azoto dujos, kuriomis užpildoma ertmė tarp šių plokštelių.



17 pav.
Įrašas lazeriniame diske
Horizontalios linijos vadinamos profiliuotais takeliais ir nukreipia reikiama linkme „skaitančio" lazerio spindulį. Atstumas tarp šių takelių yra nuo 1 iki 2 mikrometrų. Takeliuose išmušamos informacinės duobutės, kurių raštu ir užkoduojamas muzikinis kūrinys.

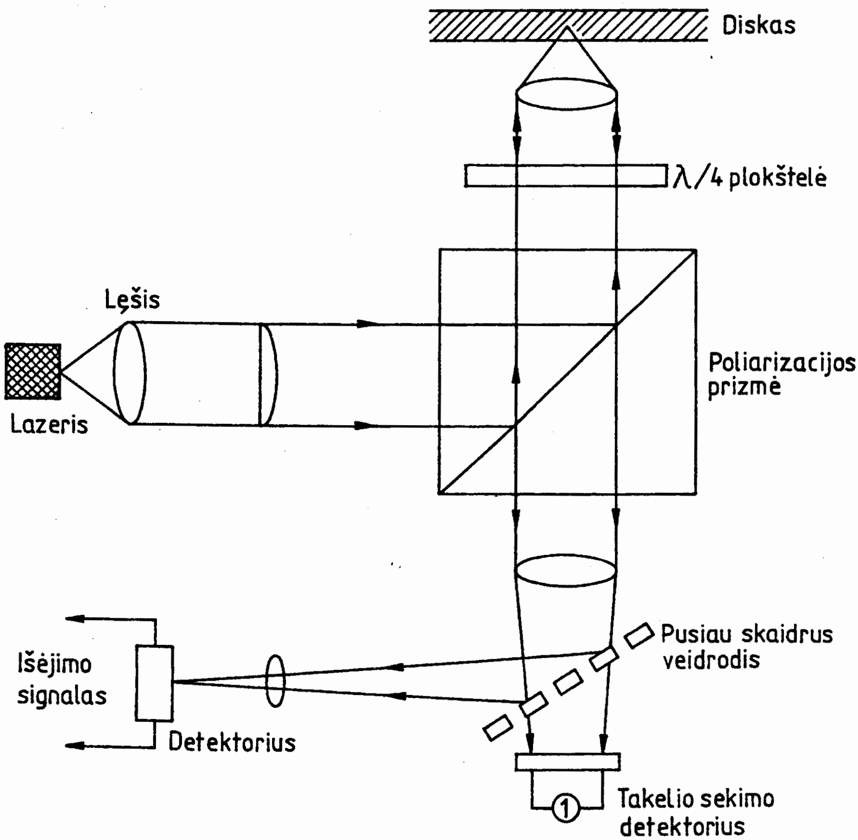
spindulį, kurio atspindys kinta, spinduliui pataikius į duobutes. Atspindėta šviesa patenka į fotodiodą, ir jis paverčia ją elektrinių impulsų seka, kurioje užkoduotas garso signalas. Optinė kompaktinių diskų grotuvo schemos dalis parodyta 18 paveiksle. Čia vaizduojama ir keletas retesnių elementų. Poliarizacijos prizmė ypatinga tuo, jog ji sugeba atskirti vieną nuo kito du priešingo poliaringumo šviesos spindulius; o $\lambda/4$ plokštelė verčia vienaip poliarizuotą šviesą kitaip poliarizuotais spinduliais.

Kadangi grotuve naudojamas šviesos spindulys turi būti sufokusuotas į mažesnio nei 1 mikrometro skersmens dėmelę, čia netinka šviesos diodai, kurių spindulio kokybė gana prasta. Todėl diske įrašytai informacijai skaityti vartojami puslaidininkiniai lazeriai. Dabar plačiau papasakosiu apie šiuos svarbius fotonikos elementus.

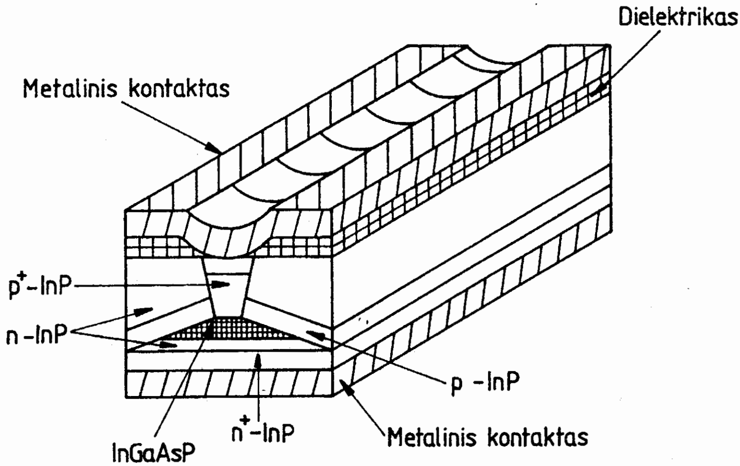
Puslaidininkinis lazeris, arba lazerinis diodas, veikia panašiai kaip ir jau anksčiau aprašytasis šviesos diodas: šviesos kvantai išspinduliuojami rekombinuojant elektronams ir skylutėms, kuriuos elektros srovė neša *pn* sandūros link (13 pav.). Tačiau rekombinacija — elektronų šuolis iš laidumo juostos lygmenų į valentinės juostos lygmenis — abiejuose prietaisuose gerokai skiriasi. Šviesos diode ji vyksta spontaniškai (savaime); elektronų šuolius galima palyginti su vandens lašų kapsėjimu po permirkusiu lietuje medžiu. Tuo tarpu lazeryje tai primena stiprią liūtį, sukeltą vėjo gūsio, staiga supurčiusio tą medį. Tuo gūsiu, pradedančiu šią, vadinamąją stimuliuotą rekombinaciją, dažniausiai tampa keletas spontaniškai išspinduliuotų to paties bangos ilgio fotonų.

Yra sukurta nemažai įvairių lazerinių diodų struktūrų rūšių, tačiau jos visos turi atitikti porą bendrų reikalavimų: visas spinduliavimas surenka-

mas nedidelėje diodo dalyje — šviesos kanale, o jis abiejose pusėse baigiasi veidrodžiais, sudarančiais lazerio rezonatorių. Vienas iš rezonatoriaus veidrodžių yra pusiau skaidrus: dalis šviesos signalo išleidžiama iš lazerio, tuo tarpu likusioji naudojama stimuliuoti elektronų ir skylučių rekombinaciją. 19 paveiksle parodyta viena iš labiausiai paplitusių lazerinio diodo struktūrų — lazeris su užauginta dviguba heterosandūra. Tai riba tarp dviejų skirtingos sudėties puslaidininkinių medžiagų. Heterosandūros atlieka net du svarbius darbus: jos vienu metu riboja ir elektros srovės tekėjimą, ir spinduliuojamą šviesos signalą mažoje lazerinės struktūros dalyje, kurios aukštis apie 0,2 mikrometro, o plotis — 10 mikrometrų eilės dydis. Elektros srovė ribojama todėl, kad dalis heterosandūrų yra įjungiama užtvarine kryptimi; o šviesa negali išeiti iš aktyviojo kanalo, sudaryto galio arsenide, dėl to, kad ji atsispindi ant jo ribos su AlGaAs, kurio lūžio rodiklis didesnis nei GaAs.



18 pav.
Lazerinių diskų grotuvo optinė schema



19 pav.
Puslaidininkinis lazerinis diodas
Sudėtinga šio diodo struktūra dar vadinama „užauginta dviguba heterostruktūra". Ji skirta sukoncentruoti tekančiai diodų srovei ir jos spinduliuojamai šviesai siaurame InGaAsP sluoksnyje. Toks diodas vartoja mažai srovės, o jo spindulio kokybė geresnė nei plataus kontakto diodų.

Lazerinis diodas yra iš tikrųjų nuostabus prietaisas; 1990 metais Vakarų šalyse buvo parduota daugiau kaip 27 milijonai lazerinių diodų, gerokai daugiau nei visų kitų rūšių lazerių kartu paėmus. Lazerinis diodas moka „skaityti" (dokumento raštą paverčia elektriniu signalu telefakse) ir „rašyti" (lazeriniame printeryje irgi įtaisytas puslaidininkinis lazeris), jo spindulį galima ir gerai sufokusuoti į mažą dėmelę, ir dideliu greičiu moduliuoti; tai taikoma optinėse ryšių linijose. Patys būdami labai miniatiūriški (bendri diodo struktūros matmenys — ne daugiau kaip keletas šimtų mikrometrų), lazeriniai diodai gali šviesti taip, kaip šimto vatų elektros lemputė. Todėl šis fotonikos elementas vertas atskiro straipsnio. Palikime tai ateičiai, o dabar grįžkime į parduotuvę prie grotuvo.

Kaip minėjome, 1990 metais parduota per 27 milijonus lazerinių diodų. Beveik 22 milijonus iš jų nupirko kompaktinių diskų grotuvų gamintojai. Apie tiek buvo parduota ir pačių grotuvų. Vis daugiau parduodama ir garsinių diskų: tais pačiais 1990 metais vien JAV jų buvo parduota net 300 milijonų, dešimt kartų daugiau nei įprastų vinilinių plokštelių. Lazeriniai diskai tampa naujos pramonės rūšies — optinės atminties įrenginių gamybos — pirmagimiu. Nepasisekus dominuoti garso įrašų rinkoje, dideli lazeriniai diskai gana plačiai taikomi kitur. Tarnybos, atsakingos už švietimo organizavimą Techase ir keliose kitose JAV valstijose, nutarė pradėti mokyti pirmųjų—šeštųjų klasių mokinius iš vadovėlių, įrašytų vaizdo diskuose. Žinant tai, jog vien Techase mokyklas lanko keletas milijonų amerikoniukų, nesunku numatyti naują šios rūšies prietaisų gamybos bumą.

Brūkšnelinis kodas

Paslaptingas brūkšnelių stulpelis etiketės kampe yra pats tikriausias prekės „firmiškumo" įrodymas. Nors taip prekės žymimos jau gana seniai, dar nuo 1974 metų, mūsų prekybininkai apskritai mažai tiki technikos pažanga — prisiminkime pardavėjas, skaitytuvais „tikrinančias" elektroninius kasos aparatus.

20 paveiksle parodytas įvairaus pločio brūkšnelių ir tuščių tarpų raštas atitinka JAV priimto dvylikos ženklų universalų produktų kodą (UPC). Tais dvylika skaičių galima atskirais kodais pažymėti net 480 milijonų įvairių prekių. To kol kas pakanka net ir turtingiesiems amerikiečiams. Viena iš dviejų kraštinių brūkšnelių juostų dar skiriama skaitmeninio kodo pradžiai pažymėti. Kodas perskaitomas specialiu stacionariu arba rankiniu skeneriu (skaitliu) ir perduodamas į kasos aparatą. Šis patikrina kiekvienos prekės pavadinimą ir kainą kompiuterio atmintyje ir viską surašo pirkėjui pateikiamame čekyje. Toks universalus kodas naudojamas ne vien didžiuosiuose supermarketuose. Panašiai pažymėti vokai — todėl paštuose jie sparčiau skirstomi — bei knygos didžiosiose bibliotekose. Amerikoje netgi yra keletas mokamų kelių. Prie įvažiavimo stovi įrengtas brūkšnelinio kodo skaitlys, todėl vairuotojui, kurio automobilis pažymėtas brūkšneliais, nereikia net stabtelėti — jo mašinos (ir sąskaitos banke) numeris nustatomas automatiškai.

Mus labiau domina pats skaitlys. Tai tipiškas fotonikos prietaisas, kurio veikimas pagrįstas skirtingu šviesos spindulio atspindžiu nuo subrūkšniuotosios ir švariosios etiketės dalių. Kasininkei braukiant skaitliu per etiketę, atspindėto spindulio energija kisdama virsta elektrinių impulsų seka, kuri kompiuterio kalba reiškia skaičių eilutę. Tiesą sakant, dirbant su naujausiais kasos aparatais, braukti skaitliu jau nebereikia, užtenka juo paliesti kodu pažymėtą vietą, ir lazerio spindulys pats perbėga brūkšnelius, o aparatas pypteli, pranešdamas, jog užduotis įvykdyta.

Įvairaus bangos ilgio spinduliai nevienodai atspindimi nuo popierinės etiketės, todėl brūkšnelinio kodo aparatuose paprastai naudojami raudonai šviečiantys lazeriai. Ilgą laiką šioje spektro dalyje daugiausia buvo įtaisomi helio ir neono dujų mišiniu užpildyti lazeriniai vamzdeliai: tik pastaraisiais metais iš brūkšnelinio kodo skaitlių rinkos juos pradėjo išstumti regimą šviesą generuojantys puslaidininkiniai lazeriniai diodai.

0 12300 16813 7

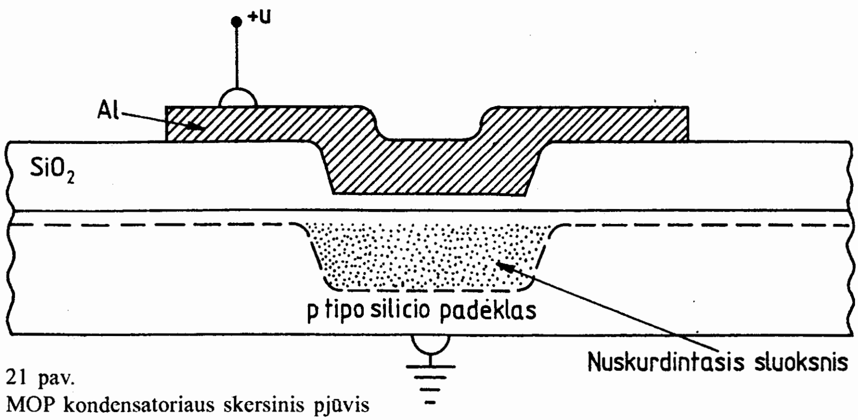
20 pav.
Brūkšnelinis kodas

Ši technika, kaip, beje, ir kiti fotonikos produktai, taip greitai keičiasi ir tobulėja, jog, sukūrus pagaliau kur nors Vilniaus „Sigmoje" brūkšnelinį kasos aparatą, gali paaiškėti, kad jis temoka skaityti tik „lietuviškai". Vakariečiai jau nori pašalinti tuos brūkšnelius, užimančius taip reikalingą reklamai vietą. Jau sukurti dažai, gerai atspindintys infraraudonuosius spindulius. Tokiais dažais nupieštas kodas būtų „matomas" tik skaitliui, o išrankiam pirkėjui toje pačioje etiketės vietoje galima būtų priminti dar vieną prekės privalumą.

Vaizdo kamera

Ankstesniame skyrelyje aprašytų brūkšnelinio kodo skaitlių nemažas trūkumas tas, jog daugelyje jų lazerio spindulys leidžiamas per brūkšnelius mechaniškai sukant veidrodėlį. O mechanikos patikimumu nelabai linkę pasitikėti ir Vakaruose. Todėl nuo 1988 metų kai kurios kompanijos ėmė gaminti visai naujo tipo skaitlius. Jų pagrindas — puslaidininkinė akis — CCD (*charge coupled device* — „sujungtų krūvių prietaisas"; tariama *si si di*). Tai vienas pačių tobuliausių puslaidininkių technologijos laimėjimų; jo pagalba buvo, beje, perduotos ir Saturno bei Jupiterio paviršiaus nuotraukos, jis leido stebėti į durų plyšį nutaikytos raketos skrydį Persijos įlankos karo metu. CCD yra taipogi ir buitinių vaizdo kamerų pagrindinis elementas, todėl ir jam skirtą skyrelį pavadinau nenutoldamas nuo savo pasirinktos „gariūniškosios" klasifikacijos.

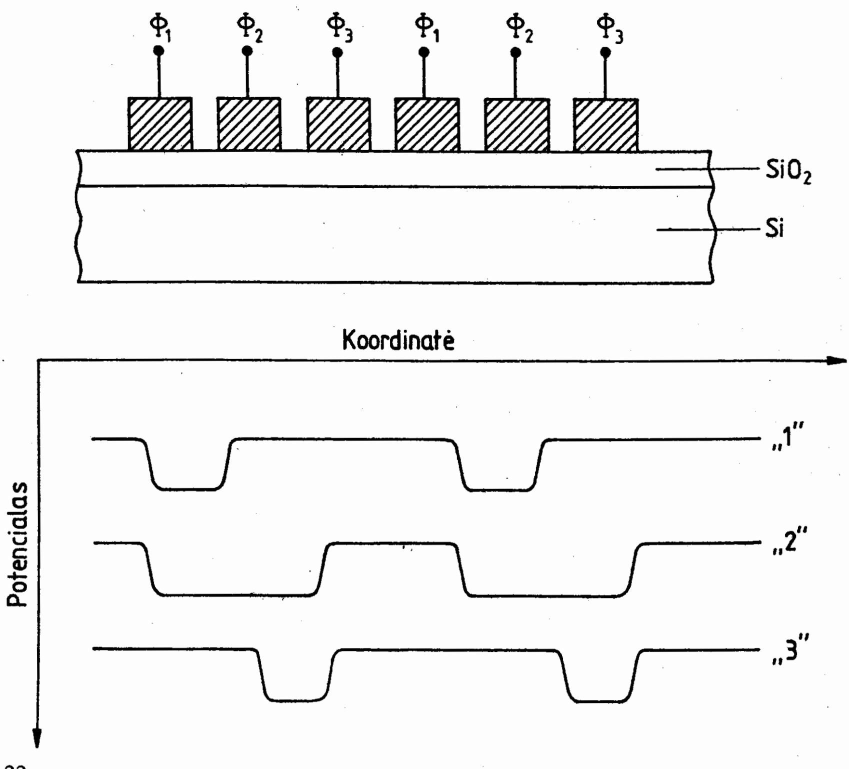
CCD sudaro daug vienas greta kito įtaisytų kondensatorių. Tie kondensatoriai ypatingi tuo, jog viena iš plokštelių yra metalinė, kita — puslaidininkinė, o tarp jų yra plonas oksido sluoksnis. Tokie kondensatoriai vadinami MOP kondensatoriais (metalas-oksidas-puslaidininkis). Vienas jų schemiškai parodytas 21 paveiksle. Puslaidininkinė kondensatoriaus



21 pav.
MOP kondensatoriaus skersinis pjūvis

plokštelė skiriasi nuo metalinės tuo, kad, kondensatorių įkrovus, elektros krūvis joje persiskirsto daug didesniame tūryje. Įkrovus, pavyzdžiui, aliuminio kontaktą teigiamai, kaip tai parodyta 22 paveiksle, tokio pat dydžio neigiamasis krūvis *p* puslaidininkyje gali atsirasti tik išstūmus teigiamąsias skylutes iš gana plačios srities po elektrodu. Pasilikę toje srityje neigiamieji akceptorinių priemaišų jonai linkę prilaikyti visus čia atsiradusius neigiamuosius elektronus. Fizikai tokiu atveju sako, jog elektronams egzistuoja potencialo duobė, į kurią patekę jie negreitai išsilaisvina.

22 paveiksle pavaizduota dalis MOP kondensatorių, sudarančių CCD grandinėles. Po jais parodyta, kaip keičiasi potencialas ant metalinių elektrodų ir potencialo duobių po jais forma. Potencialo diagramos atitinka populiariausiąjį — trijų fazių — CCD darbo režimą. Sakant „vienas", elektrinė įtampa prijungiama prie kas trečio elektrodo, pažymėto Φ_1. Po tais elektrodais ir susidaro potencialo duobės. 22 paveikslo kairėje pusėje



22 pav.
Trijų fazių registro CCD pagrindu veikimas
Viršuje pavaizduota MOP kondensatorių grandinėlės dalis, apačioje — potencialo po metaliniais elektrodais forma trimis įvairiais laiko momentais.

esančios duobės aplinkoje tuo metu būta elektronų, todėl jie visi pateko į duobę. Sakant „du", potencialo duobė išplečiama, ji dabar apima sritį po dviem gretimais elektrodais Φ_1 ir Φ_2, o trečiojoje takto dalyje potencialas paliekamas tik ant elektrodų Φ_2. Taip perjunginėjant įtampą, elektronų paketas, iš pradžių buvęs po vienu elektrodu, pasislenka į dešinę. Kito panašaus takto metu jis jau atsiduria po labiausiai kairėje esančiu elektrodu Φ_3, vėliau — po gretimu Φ_1 elektrodu ir t. t.

Šiame prietaise MOP kondensatoriai užpildo visą plokštumą. Yra gaminami CCD, kuriuose poros kvadratinių centimetrų plote sutalpinama po 1024 eilutes, o kiekvienoje iš jų yra 1024 kondensatoriai. Kiekviena eilutė baigiama schema, kuri registruoja atkeliavusį su eiliniu elektronų paketu elektros krūvį. Jei CCD plokštelė bus įtaisyta kameros židinio plokštumoje, tas krūvis rodys šviesos, sužadinusios nepusiausviruosius elektronus, intensyvumą atitinkamose tos plokštumos vietose, o nuosekliai, eilutę po eilutės, elektros krūvį skaitant, atkuriamas visas kameros registruojamas vaizdas.

Pagrindinis parametras, nuo kurio priklauso šio prietaiso darbas, yra elektros krūvio, pernešamo tarp dviejų MOP kondensatorių, dalis. Šiuolaikiniuose CCD jie siekia net 99,99 %, todėl net grandinėlėje, kurią sudaro 1024 elementai, teprarandama vos 7 % šviesos sukurto elektros krūvio.

CCD taikomas gana plačiai. Visko čia nevardysime, juolab kad mūsų aptariamojoje buitinėje technikoje jie dar nėra itin plačiai taikomi. Aišku, išskyrus vaizdo techniką, kurioje CCD atsiradimas sukėlė tikrą bumą. Tačiau jau galima nuspėti ir kitą buitinės technikos rūšį, kurios artimiausiu metu laukia revoliucinis atsinaujinimas. 1991 metais keletas japonų firmų pirmą kartą pademonstravo fotoaparatus, kuriuose vaizdas apdorojamas ne chemiškai, o CCD pagrindu veikiančia elektronine schema. Šiam aparatui nereikia fotojuostos ir užtemdytos laboratorijos. Vaizdas registruojamas aparato elektroninėje atmintyje, vėliau perduodamas kompiuteriui, o pati nuotrauka atspausdinama printeriu (spausdintuvu). Kadangi su kompiuteriu galima susisiekti iš bet kurio pasaulio krašto telefoninio ryšio dėka, naujasis fotoaparatas labai patiko žurnalistams, kurie ir tapo pirmaisiais jo vartotojais.

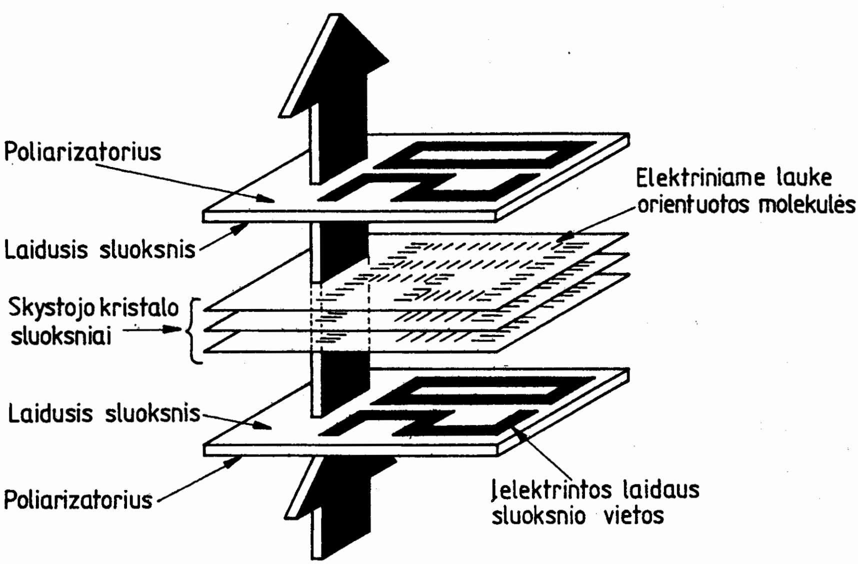
Skystųjų kristalų indikatorius

Šį fotonikos prietaisą visi ne kartą esate matę. Skaičiuotuvai, elektroniniai laikrodžiai, vaizdo magnetofonai — tai tik maža dalis buitinių prietaisų, turinčių tablo su juodais skaičiukais.

Indikatoriai su juodais skaičiukais gaminami iš ypatingos medžiagos — skystojo kristalo. Šiaip jau žinome, jog medžiaga yra arba dujinė, arba

skysta, arba kieta. Tarp pastarųjų yra medžiagų, turinčių tvarkingą — kristalinę — struktūrą. Tačiau pasirodo, jog gana artima kristalinei gali būti ir kai kurių skysčių struktūra. Paprastai tokie skysčiai yra sudaryti iš didelių ir labai anizotropiškų organinių molekulių, kurias reikėtų įsivaizduoti kaip didelę cigarų krūvą. Gretimi „cigarai" skystojo kristalo plėvelėje veikia vienas kitą elektriškai. Nors tokia sąveika ir labai silpna, jos užtenka tam, kad „cigarai" išsirikiuotų, nukreipdami savo ašis viena kryptimi.

Skystojo kristalo molekulių sąveika labai silpna, ir jų išsidėstymą lengva keisti veikiant skystąjį kristalą gana silpnais elektriniais, magnetiniais laukais ar mechaniškai. Pavyzdžiui, silpnas elektrinis laukas gana tiksliai orientuoja skystojo kristalo molekules, keisdamas pereinančios per kristalo plėvelę šviesos poliarizaciją. Jeigu krintanti į plėvelę šviesa jau yra poliarizuota, elektriniu lauku galima kontroliuoti per ją pereinančios šviesos intensyvumą. Tokiu būdu sukuriami vaizdai, raidės ar skaičiai. 23 paveiksle parodyta tipiško skystųjų kristalų indikatoriaus konstrukcija. Skystuoju kristalu užpildoma ertmė tarp dviejų plokštelių, kurių vidinės pusės padengiamos skaidriais elektrodais. Norint gauti skaičius ar raides, būtina, jog elektrodai turėtų specialų raštą — kontaktinių juostelių tinklą.



23 pav.
Skystųjų kristalų indikatorius
Skystojo kristalo sluoksniai, esantys tarp dviejų sukryžiuotų poliarizacinių filtrų, pasuka šviesos poliarizacijos plokštumą taip, kad ji pereina per visą struktūrą. Elektriniu lauku nukreipus reikiama linkme skystojo kristalo molekules, šis sukimas pakinta, todėl šviesa jau negali pereiti per viršutinį filtrą ir lauko paveiktos vietos aptemsta.

Skystieji kristalai labai blogi elektros laidininkai, todėl iš jų pagaminti indikatoriai vartoja mažai elektros energijos. Tai gana svarbus šių prietaisų privalumas. Na, o pagrindinį jų trūkumą irgi žinote: kadangi tokie indikatoriai patys šviesos nespinduliuoja, o tik ją atspindi, tai jų rodomos informacijos prieblandoje jau neįžiūrėsi.

Pora žodžių pabaigai

Taikymas buityje tėra maža visų jau dabar esamų fotoninių prietaisų naudojimo dalelė. Atskiro pokalbio tema — šiuolaikinės optinio ryšio priemonės, puslaidininkinės fotonikos naudojimas medicinoje ar kuriant naujos kartos skaičiavimo mašinas. O kai sužinai, kaip ištobulėjo kai kurios fotoninės technologijos, taikomos kariniams tikslams, tada inžinieriaus Garino hiperboloidas teatrodo kaip primityvi medinė kuoka.

Visi minėti fotonikos prietaisai — lazeriai, šviesos diodai ir t. t. — yra tuo pačiu ir paprasti, ir sudėtingi. Paprasti dėl to, kad jų veikimas grindžiamas gerai žinomais puslaidininkių fizikos ir optikos principais. Daugumas tų prietaisų gaminama ir tiriama ir Lietuvos fizikų laboratorijose. Tačiau tai, kas kruopščiu darbu pasiekiama laboratorijoje, sunkiai įkandama pramonei. Nes fotonikai reikia didelio tikslumo ir ypatingos technologinės drausmės. Jei kompaktinių diskų grotuve lazerio spindulys nukryps pusę mikrometro į šalį, jokios muzikos negirdėsime. Jei, gamindami patį lazerinį diodą, vieną iš daugelio jį sudarančių sluoksnių padarysime viena dešimtąja mikrometro storesnį ar vienu procentu suklysime numatydami to sluoksnio sudėtį, visas mūsų darbas nueis perniek — diodas nešvies. Todėl šiuos prietaisus gaminti tegali aukštos kvalifikacijos specialistas, iki smulkmenų suvokiantis jų veikimą ir padarinius, kurių susilauks nors šiek tiek nusižengęs technologiniam režimui.

Man teko lankytis firmose, gaminančiose puslaidininkinės fotonikos elementus ir sistemas. Jų inžinerinis personalas — tai fizikos fakulteto absolventai, dauguma po aukštosios mokyklos baigimo dar papildomai tobulinęsi ir apsigynę disertacijas iš įvairių taikomosios fizikos sričių. Tokie specialistai rengiami ir mūsų šalies universitetuose. O tai reiškia, jog ir gaminti šiuolaikinio lygio produkciją pas mus yra kam.

ROMUALDAS KARAZIJA

NEŽINOMIEJI ATOMAI

Spiečius elektronų, skriejančių aplink atomo branduolį, tapo mūsų amžiaus simboliu. Ne tokios senos abejonės dėl atomų egzistavimo išnyko keičiantis kartoms. Dabar mes patikime jais nuo mokyklos suolo, kaip ir tolimomis galaktikomis. Ir mokinys, rengdamasis fizikos pamokai, sako: „Atomus aš suprantu, tai labai paprasta".

Mokslininkas, tyrinėjantis atomus, taip pasakyti nesiryš. Iš tikrųjų nuo E. Rezerfordo (E. Rutherford) ir N. Boro (N. Bohr) laikų žinoma, kaip sudaryti atomai. Maždaug prieš septyniasdešimt metų plejada žymiausių fizikų — V. Heizenbergas (V. Heisenberg), E. Šrėdingeris (E. Schrödinger), V. Paulis (V. Pauli) ir kiti — per keletą metų, pakylėdami vienas kito mintį, sukūrė kvantinę mechaniką — atrado svarbiausias atomų ir kitų mikrodalelių elgsenos taisykles*. Betgi nuo jų žinojimo ligi tikslaus sudėtingų atomų savybių numatymo panašus kelias, kaip nuo Kolumbo atradimo ligi Naujojo Pasaulio užvaldymo.

Daugelio kūnų problema

Pagrindinę klasikinės mechanikos lygtį — antrąjį Niutono dėsnį — mikropasaulyje keičia Šrėdingerio lygtis, kurios sprendinys ir yra garsioji banginė funkcija. Ją žinodami, galėtume numatyti visas įmanomas mikrodalelės savybes.

Išsprendus Šrėdingerio lygtį vandenilio atomui, turinčiam tik vieną elektroną, buvo gautas vandenilio spektras — jo spinduliuojamos šviesos dažniai, kurie tiksliai sutapo su išmatuotais. Taigi abejonių neliko — keistoji kvantinė mechanika atitinka realybę.

---

* Trumpai jas priminsime. Elektronas, kaip ir kitos elementariosios dalelės, turi ir dalelės, ir bangos savybių. Dėl to vienu metu negalima tiksliai nustatyti elektrono buvimo vietos ir jo greičio. Elektrono būseną nusako vadinamoji banginė funkcija, kurios kvadratas rodo tikimybę elektronui būti vienoje ar kitoje vietoje. Tas tikimybės pasiskirstymas apie branduolį populiariai vadinamas elektrono orbita. Elektronai atome gali įgyti tik tam tikras energijos vertes, kurias atitinka leistinės būsenos, arba orbitos. Elektrono energija kinta tik jam peršokant iš vienos orbitos į kitą, tada jis spinduliuoja arba sugeria šviesos kvantą — fotoną.

Plačiau lietuvių kalba apie kvantinės mechanikos idėjas galima pasiskaityti N. Ponomariovo knygoje „Anapus kvanto" arba pirmajame leidinyje „Kas domina fizikus šiandien?" esančiame D. Grabausko straipsnyje „Judėjimas mikropasaulyje".

Deja, visos teoretikų pastangos išspręsti Šrėdingerio lygtį heliui, kur aplink branduolį skrieja du elektronai, liko bevaisės. Juk tai trijų kūnų problema, kurios tiksliai išspręsti negali ir klasikinė mechanika.

Jeigu lygties neįmanoma išspręsti algebriškai, galima ją spręsti skaitmeniškai, ypač naudojantis šiuolaikiniu kompiuteriu. Štai ne toks jau sudėtingas vario atomas, turintis tik 28 elektronus. Kiekvieno jų judėjimas apibūdinamas trimis koordinatėmis, taigi visų elektronų banginė funkcija priklauso nuo $28 \times 3 = 84$ kintamųjų. Tarkime, jog sprendinį skaičiuojame, pasirinkę tik dešimt kiekvieno kintamojo verčių; tada banginę funkciją reikėtų rasti 10^{84} taškuose. Tai toks milžiniškas skaičius, jog ne tik apskaičiuoti, bet netgi užrašyti rezultatą būna neįmanoma: neužtektų viso pasaulio popieriaus.

Fizikai ne iš tų, kurie sutrinka susidūrę su panašiais sunkumais. Juk fizikas teoretikas skiriasi nuo matematiko tuo, kad, pirma, taiko negriežtus, netgi „neleistinus" metodus ir, antra, nuolat klausia gamtos, kokių sprendinių ji nori. O gamta nėra klastinga — dažnai netgi labai apytiksliai modeliai pasirodo esą ne tokie jau tolimi nuo tiesos. Tad ir atomui — fizikų nuostabai — neblogai galioja paprastas vienelektronis modelis: kiekvienas elektronas atome išsaugo savo „individualybę", t. y. savo atskirą banginę funkciją, aprašančią jo būseną. O viso atomo būseną galima nusakyti nustačius atskirų elektronų būsenas branduolio ir kitų elektronų bendrame lauke.

Tai atlikti dar paprasčiau, atsižvelgiant į atomo simetriją: masyvus branduolys, kurio krūvis lygus visų elektronų krūviui (o jone net didesnis už jį), sukuria atome sferinį elektrinį lauką, kuriame galioja judesio kiekio momento tvermės dėsnis. Dabar kiekviename atomo teorijos centre yra universali atomo banginių funkcijų skaičiavimo programa, kuri įgalina per keletą sekundžių apskaičiuoti netgi urano atomo bangines funkcijas, energijas, vidutinius elektronų atstumus nuo branduolio ir kitas savybes.

Vidiniams elektronams, kurie juda stipriame branduolio lauke, dar tampa svarbūs specialiosios reliatyvumo teorijos efektai, bet ir tada galioja vienelektronis modelis. Jis taikomas labai plačiai, juk atomai — pagrindinės gamtos dalelės, ir jų savybės lemia įvairiausius reiškinius. Tiesa, gamtoje atomai dažniausiai susijungia į molekules ar susispaudžia į kietuosius kūnus, bet ir tada stipriai pasikeičia tik atomų išoriniai sluoksniai, o vidiniai elektronai nelabai jaučia išorinių kaimynų įtaką. Vaizdžiai šnekant, atomo šalies tyrinėtojai išsilaipino vienoje jos pakrantėje, iš vienelektronių funkcijų padirbdino patogų visureigį ir su juo bando tyrinėti šią šalį. Turi jie patikimą kompasą — kvantinės mechanikos dėsnius. Esant geram orui, nepasiekiamose aukštybėse spindi viršukalnės — tikslūs Šrėdingerio lygties sprendiniai. Deja, visureigis nuolat klimpsta tos šalies džiunglėse, tad jas gaubia dar daug paslapčių.

Gryni praktikai metodiškai, žingsnis po žingsnio, braunasi per tas džiungles. Kiti metų metais konstruoja tobulesnius visureigius. Daugelis iš jų pakyla tik į seniai nuzulintą helio aukštumėlę. Betgi būna ir didelių švenčių, kai atsiveria naujos atomo šalies sritys. Apie kai kuriuos tokius atradimus ir pasakojama tolesniuose skyreliuose.

Nei Žemėje, nei danguje...

Atomas — gana patvari sistema, bet jeigu į jį dideliu greičiu smogia kita dalelė, tai vienas ar net keli elektronai gali iš atomo išlėkti, ir jis virsta jonu. Atomas elektriškai neutralus, o elektronai neša neigiamąjį krūvį, tad jonas turi teigiamąjį krūvį, lygų pašalintų elektronų skaičiui.

Maždaug prieš 60 metų žinomo atomų tyrinėtojo švedo B. Edleno (B. Edlen) laboratorijoje buvo pastebėta, kad, šokant kibirkščiai tarp dviejų elektrodų, susidaro daugiakrūviai dujų jonai, pavyzdžiui, alavo garuose — net dvidešimt kartų jonizuoti alavo jonai. Buvo užregistruotas tokių jonų spinduliavimas, išmatuotos jų spektro linijos ir netgi kai kurios iš jų suklasifikuotos, t.y. nustatyti lygmenys, šuolius tarp kurių jos atitinka. Kaip vėliau savo atsiminimuose prisipažino B. Edlenas, jis nutarė nutraukti šiuos tyrimus, nes „atrodė neįtikėtina, kad tokie jonai galėtų būti rasti dar kur nors Žemėje ar danguje".

Likimas dažnai pasišaipo iš kategoriškų teiginių. Praėjus vos keletui metų, tas pats B. Edlenas su bendradarbiu, tirdami Saulės vainiko spektrą, turėjo pripažinti, jog kai kurios stebimos linijos atitinka šešiskart jonizuotos geležies spinduliavimą. Vėliau, II pasaulinio karo metais, buvo gautas dar sensacingesnis rezultatas: Saulės vainiko spektre rastos 9—14 kartų jonizuotų kalcio, geležies ir nikelio linijos. Tai reiškė, jog vainiko temperatūra daug aukštesnė, negu buvo manyta — siekia du milijonus laipsnių, ir teko keisti požiūrį į mūsų šviesulį.

Deja, daugiakrūviai jonai spinduliuoja daugiausia ultravioletinius bei Rentgeno spindulius, kuriuos sugeria Žemės atmosfera. Tik po karo, atidavus mokslininkams trofėjines „Fau" raketas ir pakėlus jomis prietaisus į keliasdešimties kilometrų aukštį, prasidėjo nuodugnūs Saulės spektro tyrimai, kurie atskleidė nemažai jos paslapčių.

Ne tik Saulė, bet ir daugelis kitų aktyvių žvaigždžių sudarytos iš plazmos — jonų ir elektronų mišinio. Galingus plazmos srautus išmeta į kosminę erdvę sprogstančios žvaigždės supernovos, taip pat ir kai kurios neutroninės žvaigždės ar juodosios bedugnės, traukiančios į save medžiagą iš aplinkos. Tad daugiakrūviai jonai yra ne egzotiška, o įprastinė medžiagos dalelių būsena kosmose.

Paaiškėjo, kad tokius jonus nesunkiai galima sukurti ir Žemėje — įvairių elektros iškrovų metu, nukreipus greitų elementariųjų dalelių srautą į medžiagą, pavyzdžiui, į ploną jos plėvelę, arba sufokusavus galingo lazerio spindulius. Daugiakrūviais jonais ypač susidomėta pradėjus kurti termobranduolinius reaktorius, kuriuose vyktų lengvųjų branduolių sintezės reakcija. Mat nuo reaktoriaus sienelių į plazmą pakliūva metalų jonų — žalingų priemaišų, kurių spinduliavimas trukdo pasiekti aukštą temperatūrą, būtiną sintezės reakcijai prasidėti. Antra vertus, nėra bėdos be naudos: tų jonų spektrai praneša tyrinėtojams apie reaktoriuje vykstančius procesus, plazmos tankį ar temperatūrą — paprasto termometro juk ten neįkiši. Dabar laboratorijoje galima gauti bet kurio gamtoje aptinkamo elemento bet kokį joną, netgi urano joną, turintį vos du elektronus, kaip helis, arba net vieną elektroną, kaip vandenilis.

Daugiakrūviai jonai daug mažesni už atomus, nes dalies elektronų sluoksnių jau neturi, o kiti yra pritraukti stipraus branduolio elektrinio lauko. Pastarieji „mato" mažytį branduolį nebe kaip tašką, o kaip nukleonų debesėlį. Jonuose pasidaro svarbūs reliatyvistiniai efektai, o spektro linijos, draustinės tiek pat elektronų turinčiuose neutraliuose atomuose, išeina į sceną.

Įdomu stebėti, kaip keičiasi energijos lygmenys įvairių elementų jonuose, turinčiuose tiek pat elektronų. Gretimų elementų lygmenys, pavyzdžiui, dešimtkart jonizuotos geležies ir vienuolika kartų jonizuoto kobalto, labai panašūs (pagal tai dažnai atpažįstami nežinomi lygmenys), bet, laipsniškai didėjant branduolio krūviui, lygmenys persigrupuoja, susikeičia vietomis — spektras iš esmės pakinta.

Daugiaelektronio jono ar atomo spektrą sudaro ištisas miškas linijų, atitinkančių įvairius jų spinduliuojamos šviesos dažnius. Kartais pravartu matyti ne tik atskiras linijas, bet ir spektro visumą, tarsi apžvelgti visą mišką iš tolo. Tai įgalina suprasti bendrus spektro susidarymo ir jo kitimo dėsningumus.

Atomai milžinai

Mažiausi žmogaus įžiūrimi daiktai — tai dulkelės, kurios šoka saulės spindulyje, prasiskverbusiame į tamsų kambarį. Tokia dulkelė bent dešimt tūkstančių kartų didesnė už atomą — teigia populiarios knygos. Tai teisinga, jei atomas yra pagrindinėje būsenoje. Elektronai, kaip ir mus supantys daiktai, siekia užimti mažiausios energijos būseną, betgi, kaip žinome pagal Paulio draudimo taisyklę, du elektronai atome negali būti visiškai vienodų būsenų. Tad vienam elektronui užėmus žemiausią energijos

lygmenį, kiti turi lipti energijos laiptais aukštyn. Jei elektronas sužadinamas perkeliant jį į aukštesnį laisvą energijos lygmenį, jis nutolsta nuo branduolio, taigi padidėja ir tokio atomo matmenys. Vienelektronės būsenos apibūdinamos vadinamaisiais kvantiniais skaičiais, iš kurių svarbiausias — pagrindinis kvantinis skaičius n. Kai elektrono būsena yra arčiausiai branduolio, tai $n = 1$. Sužadinant elektroną, tas skaičius didėja. 1906 m. žinomas fizikas R. Vudas (R. Wood) pastebėjo natrio garų linijas, priklausančias atomams, kurių vienas elektronas buvo perkeltas į būseną, atitinkančią $n = 60$. Tokie labai sužadinti atomai vėliau buvo pavadinti Rydbergo atomais (jų spektrus tyrinėjusio mokslininko vardu). Sukūrus lazerius, ypač kintamojo dažnio, tapo galima perkelti elektronus (dažniausiai per keletą kartų) į norimą būseną net ligi $n = 200$. O kosminėje erdvėje buvo aptikta Rydbergo atomų, kurių vienas elektronas pakilęs net į lygmenį, atitinkantį $n = 700$. Toks sužadintasis atomas maždaug 100 000 kartų didesnis už normalųjį ir netgi didesnis už dulkelę! Rydbergo atomo viduje gali skraidyti kiti atomai.

Stebina ne tik Rydbergo atomų dydis, bet ir jų gyvavimo trukmė. Paprastai sužadintas elektronas per milijardąją sekundės dalį grįžta į normalią būseną, išspinduliuodamas šviesos porciją — kvantą. Rydbergo atomai yra nepaprastai ilgaamžiai: matuojant atomo fizikoje priimtu laiko vienetu $2 \cdot 10^{-17}$ s, vos ne amžini — jų gyvavimo trukmė siekia tūkstantąsias sekundės dalis, netgi vieną sekundę. (Aišku, jei per tą laiką atomas milžinas nesusiduria su kitu atomu, nes taip sužadintam elektronui atplėšti užtenka net ir nedidelio smūgio.) Šitokios sąlygos įmanomos tik tarpžvaigždinėje erdvėje bei vakuume, kuris sukuriamas šiuolaikinėse laboratorijose.

Atomo viduje veikia labai stiprūs elektriniai ir magnetiniai laukai (judantis elektronas sudaro tarsi miniatiūrinę elektros srovę), kurie gerokai pranoksta laukus, gaunamus fizikos laboratorijose. Štai kodėl atomai mažai pasikeičia net stipriuose išoriniuose laukuose. Rydbergo atomas vėlgi yra išimtis — nutolęs nuo branduolio elektronas lengvai paklūsta laukams. Magnetinis laukas suspaudžia jo orbitą, ir atomas pasidaro panašus į ilgą adatą. O elektrinis laukas stengiasi suardyti Rydbergo atomą: lauko stipriui pasiekus tam tikrą krizinę vertę, sužadintas elektronas išstumiamas iš atomo.

Rydbergo elektronas „mato" branduolį ir kitus elektronus tarsi tašką, bet su pakeistu branduolio krūviu (elektronai ekranuoja branduolį), tad tokiam elektronui apibūdinti tinka vandenilio atomo modelis. Antra vertus, elektrono energijos pakopų aukštis mažėja didėjant pagrindiniam kvantiniam skaičiui n (proporcingai $1/n^2$), taigi sužadinti lygmenys suartėja vieni su kitais. Energijos kvantavimas — pagrindinis atomo elektrono skirtumas

nuo klasikinio elektrono — pasidaro nebe toks svarbus, tad Rydbergo elektroną galima aprašyti pusiau klasikiniais metodais.

Atomai „milžinai" domina fizikus savo išskirtinėmis savybėmis, o astrofizikus — informacija apie tai, kas vyksta tarpžvaigždinėje erdvėje. O neseniai susidomėta atomais su dviem stipriai sužadintais elektronais. Tokie atomai susidaro atomų smūgių su lėtais jonais metu arba jonams pralekiant pro kietųjų kūnų paviršių. Jonas gali atimti iš atomo ar kietojo kūno du elektronus, kurie iš pradžių užima viršutines laisvąsias būsenas ir tik paskui „nušoka" žemyn. Jei pradinės sužadintų elektronų būsenos labai skirtingos, turime vadinamąjį planetinį atomą — sužadintieji elektronai mažai veikia vienas kitą, kaip ir tolimos planetos. Jei elektronų orbitos artimos, juos reikia nagrinėti kaip stipriai sujungtų dalelių porą.

Šeimos tradicija

Sužadintasis išorinis atomo elektronas išspinduliuoja regimosios šviesos kvantą. Labai stipriai sukrėtus atomą, pavyzdžiui, smogus į jį kitai greitai dalelei, iš vidinio sluoksnio gali būti pašalinti vienas ar net keli elektronai. Tada į laisvą vietą, arba vakansiją, peršoka elektronas iš tolimesnio sluoksnio, išspinduliuodamas Rentgeno spindulių kvantą. Šių spindulių atradimas prieš šimtą metų kartu su elektrono ir atomų radioaktyvumo atradimais nurodė kelią į mikropasaulio tyrimus ir taip nužymėjo naujosios fizikos pradžią. Neatsitiktinai V. K. Rentgenui (V. K. Röntgen) už šį atradimą buvo paskirta pirmoji Nobelio premija. Toliau tiriant Rentgeno spindulius, padaryta daugybė naujų atradimų, kurie irgi pažymėti Nobelio premijomis. Tarp jų net du kartus premiją pelnė tėvas ir sūnus: 1915 m. Viljamas Henris ir Viljamas Lorensas Bregai (Bragg) — už Rentgeno spindulių atspindžio nuo kristalų tyrinėjimus, o 1981 m. Kajus Zygbanas (Siegbahn), net po 56-erių metų pakartojęs savo tėvo, Karlo Zygbano, sėkmę. Tad galime įžvelgti „šeimynines" šios mokslo srities tradicijas.

Skvarbius, didelės energijos Rentgeno spindulius ne taip lengva nukreipti ar atspindėti, tad Zygbanas tėvas kūrė pirmuosius, nelabai tobulus jų spektroskopinius prietaisus ir tyrė beveik nežinomą atomo vidinių sluoksnių sandarą. Sūnus sukonstravo spektroskopinį šedevrą — elektroninį spektrometrą, labai tiksliai matuojantį išlekiančių iš atomo elektronų energijas.

Įsivaizduokite — į bandinį nukreipiamas vienos energijos Rentgeno spindulių pluoštelis. Jis išmuša iš atomų elektronus, kurie išlekia nevienodais greičiais (pagal energijos tvermės dėsnį laisvojo elektrono kinetinė energija lygi kvanto energijai minus elektrono ryšio energija atome). O magnetinis laukas nukreipia skirtingo greičio elektronus skirtingomis

kryptimis. Prietaiso tikslumą lemia beveik idealus vakuumas (idant elektronai, susidurdami su atomais, nepakeistų savo greičių) bei idealus išorinių magnetinių laukų, tarp jų ir Žemės lauko, ekranavimas.

Šiuo prietaisu galima registruoti ir elektronus, kurie savaime išlekia iš sužadintųjų atomų, turinčių vakansiją vidiniame sluoksnyje. Mat elektronas, užpildydamas vakansiją, gali atliekamą energiją ne tik išspinduliuoti kaip fotoną, bet ir perduoti silpnai susietam elektronui (toks procesas vadinamas Ožė šuoliu).

Tyrimai elektroniniu spektrometru ir kitais moderniais prietaisais parodė, kad ne vien išoriniai, bet ir vidiniai elektronų sluoksniai yra gana sudėtingi — čia pasireiškia kolektyvinės sąveikos, įvairios anomalijos. Viena iš tokių anomalijų — vadinamasis elektrono orbitos kolapsas. Labiau žinomas žvaigždės kolapsas: masyvi žvaigždė, išdeginusi savo branduolinio kuro atsargas, ima trauktis, veikiama visuotinės traukos jėgos, ir virsta mažyte neutronine žvaigžde ar net juodąja bedugne. Staiga, nors ir ne taip katastrofiškai, gali susitraukti ir sužadintojo elektrono orbita. Pasikeitus kito elektrono būsenai, tokio elektrono vidutinis atstumas nuo branduolio sumažėja dešimtį ir daugiau kartų, nors jo energija lieka beveik nepakitusi. Užtat kai kurios elektrono charakteristikos gali pasikeisti šimtus ir netgi milijonus kartų.

Vieno atomo medžioklė

Pakaitinus mažytį medžiagos pavyzdėlį ir užregistravus jo spinduliavimą, pastebimos charakteringosios spektro linijos — „atomų šifrai", kurie atskleidžia medžiagos sudėtį. Šis fizikos metodas vis tobulėjo, bet gamta ilgai buvo nepralenkiama: šuniui užtekdavo dar mažesnio kvapios medžiagos pėdsako, kad atpažintų ją. 1959 m. tarptautiniame simpoziume P. Kapica tai suformulavo kaip vieną iš svarbių fizikos problemų: „pavyti šuns uoslę" fizikiniais metodais.

Visur, kur siekiama supertikslumo, fizikai prisimena rezonanso reiškinį. O atomuose rezonansas pats prašosi taikomas. Juk atomas gali sugerti tam tikro dažnio šviesos kvantą tik tada, jei pastarojo energija lygi dviejų atomo būsenų energijų skirtumui. Toks išimtinis vienos rūšies atomų sužadinimas tapo galimas, sukūrus kintamojo dažnio lazerius. O kad įvairių atomų energijos atsitiktinai nesutaptų, atomas sužadinamas paeiliui keliais lazeriais. Gautas Rydbergo atomas jonizuojamas elektrinio lauko impulsu. Pastebėti atsiradusį joną — jau technikos problema. Jis pagreitinamas ir nukreipiamas į skaitiklį, kur elektriniame lauke sukelia jonizacijos griūtį — grandininę atomų jonizaciją. Tokiu būdu fizikai sugeba išskirti vieną

atomą iš 10^{20} kitokių — o tai daug sunkiau, negu rasti adatą šieno kupetoje.

O gal įmanoma ne tik išskirti vieną atomą, bet ir išlaikyti jį izoliuotą nuo kitų, kol su juo bus atlikti bandymai. Juk tyrinėjant daugelio atomų „kolektyvą", jų tarpusavio sąveikos sukelia paklaidas. Atlikus bandymą su vienu atomu, būtų galima atlikti preciziškus matavimus.

Atskirų atomų gaudykles daugelį metų kūrė vokietis H. Demeltas (H. Dehmelt) ir amerikietis V. Paulis (V. Pauli), konkuruodami ir lenktyniaudami vienas su kitu. Jie panaudojo specialios formos elektrinius ir magnetinius laukus. Dar sunkiau išlaikyti gaudyklėje sugautą neutralųjį atomą, tad buvo išrastas išmoningas būdas jį „atšaldyti" lazerio spinduliu. Pirmąjį sėkmingą eksperimentą su vienišu bario jonu atliko H. Demeltas ir jo bendradarbiai aštuntojo dešimtmečio pabaigoje. Atomų gaudyklės tuoj pat buvo pritaikytos pagrindiniams fizikos dėsniams tikrinti išimtiniu tikslumu ir ypač tiksliems atominiams laikrodžiams kurti. Demeltui pavyko netgi pagauti pozitroną, elektrono antidalelę, ir išlaikyti jį gaudyklėje tris mėnesius. Per tą laiką mokslininkas priprato prie savo dalelės ir netgi ėmė vadinti ją vardu — Priscila.

V. Paulio ir H. Demelto atradimai greit sulaukė pripažinimo mokslo pasaulyje, ir jie tapo 1989 m. Nobelio premijos laureatais.

VIKTORIJA GINEITYTĖ

MOLEKULIŲ SANDARA FIZIKOS IR CHEMIJOS POŽIŪRIU

Jau nuo mokyklos suolo žinome, jog fizika nagrinėja bendriausius gamtos dėsnius. Tačiau ar tai reiškia, kad šis mokslas pajėgus paaiškinti ir kitų gamtos mokslų (chemijos, biologijos) tiriamus reiškinius? Neretas fizikas linkęs į šį klausimą atsakyti teigiamai. Tokia pažiūra suteikia fizikos mokslui „vyresniojo brolio" padėtį tarp gamtos mokslų, o patys fizikai dažnai žiūri į chemiją ar biologiją kaip į nevertus jų dėmesio „aprašomuosius" mokslus. Tačiau ar toks požiūris teisingas? Ar visada bendriausias dėsnis yra ir pats tinkamiausias, o tuo labiau, ar jo pakanka nagrinėjant konkrečią, labai sudėtingą chemijos ar biologijos problemą? Šie klausimai ypač aktualūs dabar, kai siekiama jungti įvairias mokslo šakas. Juk nuo požiūrio į šią problemą priklauso, kaip jos bus jungiamos: ar tai bus vienų mokslų ekspansija į kitus, ar jų suartėjimas lygiais pagrindais. Minėti klausimai, be abejo, labai platūs. Todėl šiame skyrelyje aptarsime tik kai kuriuos fizikos ir chemijos tarpusavio santykių aspektus, rodančius dviejų mokslų integracijos problematiškumą.

Istoriškai taip susiklostė, kad molekulės tapo tiek fizikos, tiek chemijos objektu. Todėl esama dviejų skirtingų požiūrių į jų sandarą. Čia ir bandysime šiuos požiūrius palyginti.

Pradėsime nuo fizikos. Kaip žinoma, klasikinė molekulinė fizika nagrinėja didelių molekulių „kolektyvų" (pvz., idealiųjų dujų) makroskopines savybes, netyrinėdama vidinės atskirų molekulių sandaros. Fizikinė šių dalelių sandaros teorija gimė tik XX a. pradžioje, turint pakankamai reikiamų eksperimentinių duomenų, taip pat molekulėms tirti pritaikius kvantinę mechaniką. Beje, pastaroji iš pradžių buvo kuriama tiriant ne molekules, o joms giminingas daleles — atomus. Todėl, nagrinėjant molekulių sandaros kvantinę teoriją, dažniausiai laikomasi metodinio principo „nuo atomo prie molekulės", kuris anaiptol nėra vien duoklė istorinei tradicijai, o atspindi vieningą kvantinės mechanikos požiūrį į visus mikropasaulio objektus ir faktiškai reiškia „nuo paprastesnio prie sudėtingesnio". Galima netgi teigti, jog nėra dviejų atskirų atomų ir molekulių sandaros kvantinių teorijų, o yra viena sudėtingų mikrodalelių kvantinė teorija. Tad aptariant pirmiau atomų, po to molekulių kvantinės teorijos ypatybes, kaip tik ir galima įsitikinti šios teorijos universalumu.

Mūsų amžiaus pradžioje jau buvo žinoma, kad atomų spektrai yra sudaryti iš atskirų linijų. Tai vertė manyti, jog elektronams atome būdingos ne bet kokios, o tik tam tikros, t. y. diskretinės, energijos vertės. To negalėjo paaiškinti nei klasikinė mechanika, nei klasikinė elektrodinamika. Ir tik padarius prielaidą, jog elektronas nėra klasikinė dalelė, o turi ir banginių savybių, buvo pasiūlyta jo judėjimo lygtis (Šrėdingerio lygtis), kurios sprendiniams (elektrono būsenoms) pasirodė būdingos būtent diskrečiosios energijos vertės. Pats elektronas, esantis vienoje iš tokių būsenų, apibūdinamas ne klasikine trajektorija, o tikimybe rasti jį tam tikroje erdvės dalyje. Sudėtinguose atomuose, turinčiuose ne vieną, o daugiau elektronų, pastarieji yra neatskiriami ir aprašomi tikimybe rasti kurį nors iš jų (bet ne konkretų elektroną) mus dominančioje erdvės dalyje. Ši tikimybė nusako vidutinį elektronų debesėlio tankį. Kadangi branduolio elektrinis laukas sferiškai simetriškas, toks pat yra ir elektronų debesėlis, o jo tankis praktiškai priklauso tik nuo atstumo iki branduolio. Pažymėtina, kad elektronai, nors yra neatskiriami, bet gali turėti skirtingas energijas. Iš tiesų, kai sakoma, kad atome yra elektronas, turintis energiją E, tai reiškia, kad tokia energija yra būdinga vienam iš jų. Tikimybės rasti fiksuotų energijų elektronus tam tikrose erdvės dalyse ir tų energijų diskrečiųjų verčių seka — tokia yra vidinė debesėlio sandara, kuri atsiskleidžia, atomui sąveikaujant su šviesa: atomui sugeriant fotoną, vienas iš jo elektronų peršoka į didesnės energijos būseną.

Sukūrus atomo kvantinės teorijos pagrindus, natūralu buvo panagrinėti ir giminingas daleles — molekules. Daroma prielaida, jog atomas nuo molekulės skiriasi tik tuo, kad pirmasis turi vieną branduolį, o antroji — kelis. Šių dalelių giminingumą rodė ir panašūs jų spektrai: abiem atvejais jie susideda iš atskirų linijų.

Taigi kvantinėje mechanikoje laikoma, kad molekulė sudaryta iš branduolių ir elektronų. Šiai sudėtingai sąveikaujančių dalelių sistemai sprendžiama Šrėdingerio lygtis. Kadangi branduolio masė apie tūkstantį kartų didesnė už elektrono masę, molekulėje jie juda visiškai skirtingai. Branduolių judėjimas yra beveik klasikinis — jie paprastai tik svyruoja apie pusiausvyros padėtis, kurios sutampa su elektronų sukurto traukos potencialo minimumais. Kadangi tokio svyravimo amplitudės yra daug mažesnės už atstumus tarp gretimų branduolių pusiausvyros padėčių, tai praktiškai branduolius galima laikyti nejudančiais. Vadinasi, molekulės forma apibūdinama vidutiniais tarpbranduoliniais atstumais ir kampais tarp juos jungiančių atkarpų. Taigi branduoliai sudaro molekulės „karkasą", kuris „panardintas" į elektronų debesėlį. Pastarasis turi visai panašių į atomo elektronų debesėlį savybių, tik jo tankis nebėra sferiškai simetriškas. Dviatomės molekulės debesėlis lieka cilindrinės simetrijos, o susidarius

cheminei jungčiai, branduolius jungiančios linijos aplinkoje padidėja elektronų tankis.

Šrėdingerio lygties sprendimas taip pat rodo, jog molekulės energija yra mažesnė negu atitinkamų atomų energijų suma. Tai visai suprantama, nes priešingu atveju molekulė nebūtų stabili sistema ir bematant disocijuotų į atomus. Kaip ir apibūdinant atomą, išsprendus Šrėdingerio lygtį, gali būti nustatytos molekulės elektronų energijos leistinos vertės bei atskiras būsenas atitinkančios jų radimo erdvėje tikimybės. Šie dydžiai sudaro vidinę debesėlio sandarą (vadinamą elektronine molekulės sandara), kuri, kaip ir atomo, pasireiškia molekulei sąveikaujant su šviesa ir sąlygoja linijinį jos spektrą. Taigi kvantinė molekulių sandaros teorija išryškina jų giminingumą su atomais.

Dabar aptarsime klasikinės chemijos požiūrį į molekulės sandarą ir palyginsime jį su čia pateikiamu kvantiniu požiūriu.

Chemijoje laikoma, kad molekulė sudaryta iš atomų, nes gerai žinome, kad molekulė disocijuoja į atomus. Manoma, kad atomai molekulėje veikia vienas kitą ir todėl gali pasikeisti, tačiau esminės jų savybės, skiriančios vienos rūšies atomą nuo kitos (pvz., C nuo N) išlieka. Vadinasi, molekulė, skirtingai negu atomas, chemijoje yra laikoma sudėtine dalele. Jos atomų poros yra skirstomos į chemine jungtimi susijusias ir nesusijusias (pvz., H_2O molekulėje O atomas susijęs su abiem H atomais, o vandenilio atomai tarpusavy nesusiję). Molekulės cheminių jungčių sistemą vaizduoja jos cheminė formulė. Tad molekulės sandara chemijoje suprantama kaip ją sudarančių atomų ir jų poras jungiančių jungčių visuma. Šią sampratą galima plėsti įtraukiant tarpatominius atstumus, jų tarpusavio kampus bei parametrus, kurie apibūdina erdvinį atomų išsidėstymą. Tačiau ši informacija paprastai laikoma antrine, palyginti su cheminių jungčių sistema.

Cheminės jungties sąvokos turinys išgyveno ilgą evoliuciją nuo mechaninių vaizdinių (pvz., atomus jungiantys kabliukai) iki lokalizuotų, ryšį sudarančių elektronų porų. Čia reikia pasakyti, jog kvantinė mechanika neturi kokybinio kriterijaus surištiesiems ir nesurištiesiems molekulės atomams skirti, nors kiekybiniai skirtumai pastebimi: surištuosius atomus atitinkantys tarpbranduoliniai atstumai paprastai trumpesni, o elektroninis tankis tarp branduolių didesnis. Tačiau, žinant šiuos dėsningumus, dar negalima atsakyti į klausimą, kada atomai jau surišti, o kada dar ne. Tiesa, tokius kriterijus bandyta suformuluoti tiriant elektronų tankio funkcijos topologines savybes, bet tada reikia remtis papildomais, jau ne kvantiniais mechaniniais postulatais. Be abejo, pažintine prasme šie bandymai įdomūs, tačiau taip tiesiogiai ieškoti kvantinio mechaninio atitikmens tam tikrai chemijos sąvokai labiau skatina fizikų svajonė viską paaiškinti fizikos dėsniais negu būtinumas. Iš tiesų,

labiau patyrinėjus chemijos objektą ir tikslus, pasirodo, jog toks problemos formulavimas nėra visai korektiškas, nes chemijos sukauptas pažintinis turinys — ne atskirų jos savokų turinio nusakymas, o jomis išreikštas molekulių lyginimo tarpusavy principas. Siekiant plačiau atskleisti šią mintį, lygintini chemijos ir kvantinės mechanikos objektas bei tikslai.

Kaip jau minėjome, kvantinės mechanikos objektu gali būti bet kokia mikrodalelė (elektronas, atomas, molekulė, kristalas ir t. t.). Visais šiais atvejais sprendžiama ta pati Šrėdingerio lygtis, joje konkretinant tik tiriamą objektą sudarančių branduolių tipus, kiekvieno tipo branduolių skaičių, taip pat bendrą sistemos elektronų skaičių. Tai, kad viena lygtis tinka visiems mikroobjektams, ir rodo didelį kvantinės mechanikos universalumą. Čia galima paminėti, jog, kuriant fizikos teorijas, visada ieškoma būtent kuo universalesnių lygčių. Tačiau, kalbant apie molekulių kvantinę teoriją, svarbu pabrėžti, jog jos objektas visada yra viena, konkreti molekulė. Taip yra todėl, kad dviejų, net ir labai panašių molekulių Šrėdingerio lygtys niekuo nesusijusios. Tai du nepriklausomi uždaviniai, tik jų sprendiniai gali būti panašūs arba nepanašūs. Nesusijusios lygtys atitinka taip pat molekulę ir ją „sudarančius" atomus (kabutės čia rodo, jog ši sąvoka sąlyginė). Chemijos objektas, priešingai, yra ne tiek atskira molekulė, kiek jų sekos ir klasės (tipai). Individualios atskiro junginio savybės čia nagrinėjamos giminingų junginių kontekste, o atskirõs molekulės cheminės formulės turinys atsiskleidžia lyginant ją su kitomis. Pvz., metilo alkoholio formulė (CH_3– OH) rodo, jog dalis šios molekulės (OH grupė) yra giminingа vandeniui (HOH), o kita dalis (CH_3 grupė) — etano molekulei (CH_3– CH_3). Manoma, kad toks sandaros giminingumas leidžia tikėtis ir tam tikro savybių panašumo. Pažymėtina, kad čia turimas galvoje atskirų molekulės dalių sandaros giminingumas. Taigi, cheminiu požiūriu, molekulė tarsi išnarstoma į dalis. Tai visai nebūdinga kvantinei mechanikai, kur tiek dviatomė molekulė, tiek makroskopinių dydžių polimeras traktuojami vienodai, laikant juos vieninga visuma ir sprendžiant atitinkamas Šrėdingerio lygtis. (Čia pažymėsime, kad praktiškai toks sprendimas šimtus atomų turinčiai makromolekulei sunkiai įmanomas.) Be to, chemija leidžia ir molekulės savybėms taikyti vadinamąjį adityvumo principą, t. y. ieškoti visos molekulės savybės kaip atskirus jos atomus (ar atomų grupes) atitinkančių indėlių sumos.

Apskritai galima pasakyti, jog pagrindinis chemijos tikslas — ieškoti panašios sandaros molekulių sekų dėsningumų, o cheminių formulių kalba atspindi santykinį jų sandaros panašumą. Minėtam tikslui konkretus atomo molekulėje ar cheminio ryšio sąvokų turinys nėra labai svarbus.

Santykinė (lyginamoji) cheminės formulės prasmė ypač atsiskleidžia šiuolaikinėje mokslo šakoje — matematinėje chemijoje, kurią galima laikyti tiesioginiu klasikinės chemijos tęsiniu. Molekulių sekų sandaros ir savybių

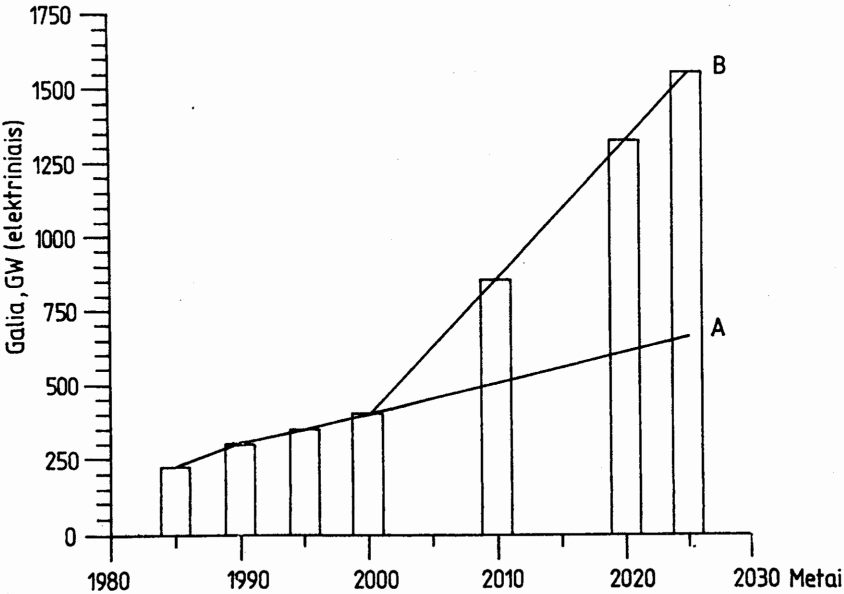
dėsningumams aprašyti čia taikoma matematikos šaka, vadinamoji grafų teorija. Grafas yra matematinis objektas, kurį sudaro baigtinė aibė taškų (vadinamų jo viršūnėmis) ir kai kurias (arba visas) jų poras jungiantys ryšiai. Geometrinės figūros — trikampis, keturkampis, žiūrint į jas kaip į tam tikrą taškų sujungimo būdą ir neatsižvelgiant į konkrečius kraštinių ilgius ir kampus, kurie į grafo sąvoką neįeina, — taip pat yra grafai. Taigi sakysime, visi galimi trikampiai yra vienas grafas, kuris išliktų tas pats net ir deformavus kraštines. Tad grafo sąvoka apima tik labai bendras objekto savybes, todėl, taikant šią teoriją, pavyksta aprašyti visai skirtingus objektus (pvz., geležinkelių ar automobilių kelių, telefono ar kitų ryšių schemas, elektrinę grandinę). Tačiau grįžkime prie molekulių. Cheminę formulę pakeitę grafu, atsižvelgiame tik į pagrindines molekulės sandaros ypatybes (skirtingos rūšies atomai grafe gali būti vaizduojami skirtingo tipo viršūnėmis). Tačiau ir taip labai supaprastinus, remiantis grafų teorija, galima spręsti daugelį praktiškai svarbių uždavinių. Vienas jų — naujų junginių savybių prognozė. Ypač sėkmingai sekasi prognozuoti panašios sandaros molekulių sekų savybių kitimo dėsningumus. Tai rodo, kad šie dėsningumai priklauso būtent nuo bendriausių sandaros ypatybių kitimo molekulių sekoje, o tai ir atspindi jų grafų seka.

Taigi galima padaryti išvadą, kad fizika (kvantinė mechanika) ir chemija nagrinėja molekules skirtingais požiūriais, kurie veikiau vienas kitą papildo, negu gali pakeisti. Todėl, mėginant jungti šiuos mokslus, būtų tikslinga žiūrėti į juos kaip į lygiaverčius. Kvantinė mechanika, be abejo, nepakeičiama, kai reikia detalios informacijos apie konkrečios molekulės sandarą. Tačiau ši teorija negali aprėpti didžiulės molekulių, ypač organinių, įvairovės. Dabar jau žinoma apie 8 milijonai skirtingų molekulių, ir šis skaičius nuolat didėja. Todėl vargu ar galima kada nors tikėtis, kad kiekvienos iš jų bus išspręsta Šrėdingerio lygtis ir palyginti atitinkami sprendiniai. Be to, darosi būtina klasifikuoti žinomas molekules, sudaryti duomenų apie jas bankus, naudojantis kompiuteriais. Sprendžiant šiuos klausimus, molekulės cheminė formulė (arba abstraktesnė jos forma — grafas) niekuo nepakeičiama.

TATJANA NEDVECKAITĖ

ČERNOBYLIO ATOMINĖS ELEKTRINĖS AVARIJOS PAMOKOS IR PADARINIAI LIETUVOJE

Išvystyta energetika būtina kiekvienos šalies ekonominiam, kartu ir politiniam egzistavimui. Šiuo metu branduolinei energetikai tenka nemaža dalis mūsų planetos gyventojų vartojamos elektros energijos, o ateityje, mažėjant kitų energijos šaltinių ištekliams, jos svarba vis didės. 24 paveiksle vaizduojama elektros energijos gamybos atominėse elektrinėse (toliau AE) prognozė. Būtina prisiminti, kad šie dydžiai yra apytiksliai, todėl nurodomos tik galimos kitimo ribos. 1986 m. duomenimis, daugiausia AE buvo Prancūzijoje — 55 veikiantys blokai, kurie gamino 75 % krašto elektros energijos. Japonijoje 40 AE blokų gamino apie 30 %, JAV 110 blokų — apie 20 % elektros energijos. Buvusioje SSRS 18 AE blokų gamino 15 % krašte vartojamos elektros energijos; tarp kitų pasaulio valstybių ji buvo tik 17 vietoje.



24 pav.
Pasaulinė elektros energijos gamyba AE ir jos didėjimo prognozė (be buvusių socialistinio bloko šalių) pagal 1986 m. paskelbtus duomenis: A — minimalus prognozuojamas galios lygis, B — maksimalus prognozuojamas galios lygis

Tačiau, pradėjusi vartoti branduolinę energiją, žmonija padarė dvi klaidas, dėl kurių į branduolinę energetiką žvelgiama su dideliu nepasitikėjimu. Tai, pirma, tragiški jos naudojimo kariniams tikslams padariniai (atominių bombų sprogimai Chirosimoje ir Nagasakyje, pagaminta daug branduolinio ginklo) ir, antra, taupumo sumetimais ir dėl žinių stokos AE konstrukcijos buvo supaprastintos, o dėl to jau įvyko keletas didelių avarijų. Be to, gyventojai nesupažindinami su pagrindinėmis radiacinės apsaugos nuostatomis AE avarijų atvejais.

Kaip rodo pasaulinė praktika, eksploatuojant tokius galingus energetikos objektus, kaip AE, esama tikimybės įvykti didesnei ar mažesnei avarijai. Todėl svarbu išnagrinėti didžiausios per visą branduolinės energetikos vystymosi istoriją Černobylio AE (toliau ČAE) avarijos priežastis ir padarinius, aptarti svarbiausias radiacinės apsaugos problemas.

Radiacinė apsauga — nauja pastarųjų dešimtmečių problema Lietuvoje. Dėl įteisintos terminologijos stygiaus šį tekstą parengti buvo sudėtinga. Dėkoju gamtos mokslų daktarei Eglei Borutaitei-Makariūnienei ir Fizikos terminijos komitetui, kurie padėjo kurti šią terminologiją Lietuvoje.

Jonizuojančioji ir nejonizuojančioji spinduliuotė („radiacija")

Jonizuojančioji (elektromagnetinė ir korpuskulinė) ir nejonizuojančioji elektromagnetinė spinduliuotė.
Radioaktyvumo, pusamžio, izotopo ir kitos sąvokos. Radioaktyviųjų izotopų aktyvumo matavimo vienetas — bekerelis (Bq).

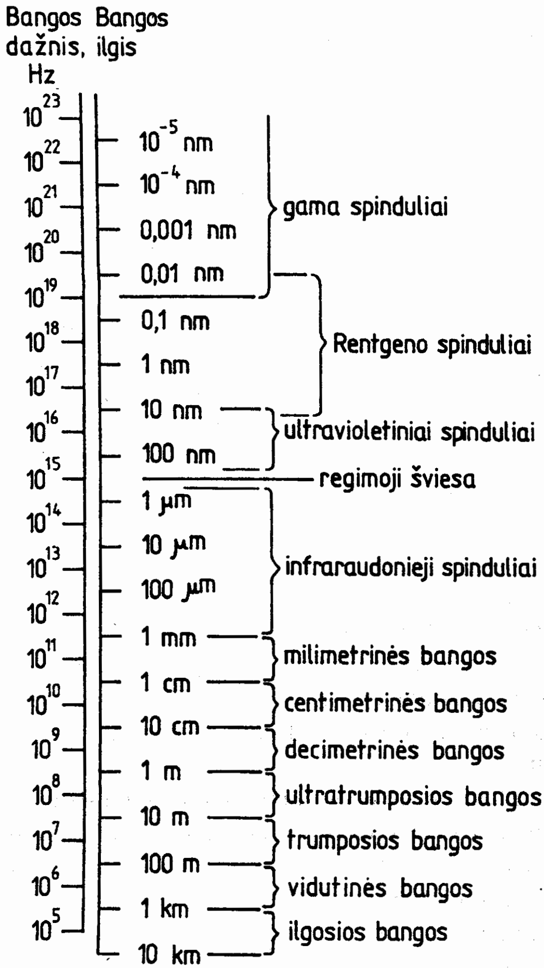
Mes gyvename tarp visomis kryptimis sklindančių įvairiausio ilgio (dažnio) elektromagnetinių bangų, tarsi panirę jų okeane. Tai šviesos, radijo ir televizijos bangos, šiluminiai, gama spinduliai ir kt., dažnai neteisingai žmonių vadinami vienu žodžiu — „radiacija". Be to, erdvę varsto pavienės greitosios mikrodalelės bei jų srautai — korpuskulinė spinduliuotė.

Elektromagnetinė spinduliuotė — tai susiję tarpusavyje sūkuriniai elektriniai ir magnetiniai laukai (sklinda 300 milijonų metrų sekundei greičiu). Pagal bangos dažnį ji skirstoma į šiuos diapazonus: radijo ir televizijos bangos, optinės bangos (nejonizuojančioji elektromagnetinė spinduliuotė), Rentgeno ir gama spinduliai (jonizuojančioji elektromagnetinė spinduliuotė). Tai vaizdžiai paaiškinta 25 paveiksle. Jonizuojančioji spinduliuotė gali būti ir korpuskulinė — tai alfa, beta ir kitos dalelės bei jų srautai. Iš visų jonizuojančiosios spinduliuotės rūšių smulkiau aptarsime tik alfa ir beta

daleles (korpuskulinę spinduliuotę), Rentgeno ir gama spindulius (elektromagnetinę spinduliuotę) bei ypatingą korpuskulinės spinduliuotės rūšį — neutronus.

Tolesniam aiškinimui būtina prisiminti radioaktyvumo, atomo sandaros, izotopo, kai kurių vienetų ir kitas sąvokas bei apibrėžimus.

Atomo sandara. Atomas susideda iš branduolio ir elektronų apvalkalo. Atomų branduoliai sudaryti iš teigiamąjį krūvį turinčių protonų ir neutralių dalelių — neutronų. To paties cheminio elemento atomai turi vienodą skaičių protonų (atominis skaičius), o protonų ir neutronų masė apytiksliai atitinka atomo masę (masės skaičius).



25 pav.
Elektromagnetinė nejonizuojančioji (bangos dažnis iki 10^{16} Hz, ilgis > 10 nm) ir jonizuojančioji (bangos dažnis > 10^{16} Hz, ilgis < 10 nm) spinduliuotė

Izotopai — tai to paties cheminio elemento atomai, turintys tiek pat protonų, bet skirtingą skaičių neutronų. Tas pats cheminis elementas gali turėti keletą izotopų, kurie žymimi šitaip: ^{134}Cs, ^{137}Cs arba Cs-134, Cs-137.

Nuklidai — tai atomai, turintys tam tikrą skaičių protonų ir neutronų. Nuklidai, kurių atomų branduoliams būdingas savaiminis skilimas, vadinami radionuklidais.

Radioaktyvumas — savaiminis atomo branduolio skilimas spinduliuojant alfa, beta daleles, gama spindulius ir kt.

Pusamžis. Praėjus laikui, lygiam vienam pusamžiui, lieka pusė izotopo pradinio radioaktyviųjų atomų kiekio.

Bekerelis — tai tarptautinės vienetų sistemos radioaktyviosios medžiagos aktyvumo, kai per vieną sekundę įvyksta vienas atomo branduolio savaiminis skilimas, vienetas — Bq. Anksčiau buvo vartojamas vienetas kiuris — Ci.

Dabar jau galima aptarti ir svarbiausias jonizuojančiosios spinduliuotės rūšis bei korpuskulinę neutroninę spinduliuotę.

Alfa dalelės sudarytos iš dviejų neutronų ir dviejų protonų. Dėl didelės masės jos jonizuoja daug atomų. Kūno audiniuose nulekia iki kelių

dešimčių mikrometrų, ore — ne daugiau kaip 10 cm. Apsisaugoti nuo alfa dalelių išorinio poveikio nesudėtinga. Jas sugeria drabužiai, rašomojo popieriaus lapas, netgi didesnis oro tarpas. Tačiau, į žmogaus organizmą patekus (kvėpuojant, su maistu) alfa daleles spinduliuojančioms medžiagoms, dėl didelės kūno audinius jonizuojančios galios šios dalelės yra labai pavojingos.

Beta dalelės — elektronų srautas. Jų masė maža, todėl ir jonizacijos intensyvumas mažas. Ore jos nulekia keletą metrų, o gyvuosiuose organizmuose — iki vieno centimetro. Jas sulaikyti gali jau ne popieriaus lapas, o tik storoka knyga arba organinis stiklas, kurio storis daugiau kaip 1 cm.

Neutronai — tai neutralios, neturinčios elektros krūvio dalelės, kurių masė beveik 2000 kartų didesnė už elektronų masę. Šias daleles skleidžia, pavyzdžiui, urano ir plutonio atomų branduoliai, vykstant jų dalijimosi reakcijoms. Neutronais apšvitinti stabilieji (pavyzdžiui, žmogaus kūno) atomai virsta radioaktyviaisiais, todėl neutronai yra ypač pavojingi. Ši jų savybė taikoma gaminant branduolinio ginklo rūšį — neutroninę bombą. Jai sprogus, sunaikinami gyvieji organizmai, lieka „negyvi miestai". Nuo neutronų apsisaugoti itin sudėtinga.

Gama ir Rentgeno spinduliai — labai trumpos elektromagnetinės bangos, kurias sužadinti atomų branduoliai spinduliuoja išlėkus alfa arba beta dalelėms. Šie spinduliai ore nulekia dešimtis metrų, jie lengvai prasiskverbia pro gyvųjų organizmų audinius. Apsisaugoti nuo jų poveikio galima šviniiniais ekranais arba bent požeminėse slėptuvėse.

Jonizuojančiosios ir nejonizuojančiosios spinduliuotės biologinis poveikis. Išorinės ir vidinės jonizuojančiosios spinduliuotės dozių sąvokos

Pirminis ir antrinis jonizuojančiosios spinduliuotės poveikis gyviesiems organizmams.
Nejonizuojančiosios spinduliuotės poveikis žmogui.
Išorinės ir vidinės apšvitos sąvokos. Sugertoji, lygiavertė ir ekspozicinė dozės.

Pirminis ir antrinis jonizuojančiosios spinduliuotės biologinis poveikis

Šiuo metu iki galo dar nėra išaiškintas biologinis atsakas į jonizuojančiosios spinduliuotės poveikį, vadinamasis „radiobiologinis paradoksas": ir labai mažai sugėrus šios energijos, poveikis gyviesiems organizmams didelis. Mirtina dozė — iš 10^{11} atomų, sudarančių kurį nors žmogaus kūno audinį, jonizuotų tik apie 200. Šį energijos kiekį pavertus šilumine energija, žmogaus kūno temperatūra padidėtų tik 0,001°C, t. y. tiek pat, kiek išgėrus vieną stiklinę arbatos. Paprastose medžiagose, kurių molekulės susideda iš to paties elemento atomų (metaluose, dujose ir t. t.), kartu su jonizacija vyksta ir rekombinacija: jonizuotasis atomas prisijungia laisvąjį elektroną, kurių tokiose medžiagose visada apstu, ir vėl susidaro neutralus atomas. Dėl to paprastų medžiagų jonizacija ir sužadinimas iki gana didelės ribos nesukelia didesnių fizikinių ir cheminių pokyčių.

Visiškai kiti procesai vyksta sudėtingose medžiagose ir gyvuosiuose

organizmuose, kurių molekulės sudarytos iš skirtingų atomų. Šiuo atveju jonizuojančiųjų spindulių poveikio etapai du: pirminis, sukeliantis fizikinius ir cheminius pokyčius, ir antrinis — biologinis.

Pirminis poveikis — pirmas dramos, kuri vyksta jonizuojančiosios spinduliuotės apšvitintame organizme, aktas trunka tik akimirką (apie 10^{-12} s), sukelia atomų ir molekulių jonizaciją bei juos sužadina. Be to, molekulėse gali būti nutrauktos cheminės jungtys, susidaryti laisvieji radikalai. Per labai trumpą laiko tarpą (apie 10^{-9} s), vykstant cheminėms reakcijoms, susidarę laisvieji radikalai bei sužadintieji atomai yra chemiškai labai aktyvūs ir reaguoja su įvairiais cheminiais junginiais.

Antrasis dramos aktas būdingas daugiausia gyviesiems organizmams ir, palyginti su pirmuoju, tęsiasi daug ilgiau. Ląstelių funkcijos sutrinka per kelias sekundes ar minutes, o atskiri organai ir jų funkcijos pakinta per įvairų laiką: nuo kelių minučių iki kelių mėnesių arba daugiau priklausomai nuo sugerto energijos kiekio, švitinamo kūno paviršiaus ploto ir daugelio kitų priežasčių.

Jonizuojančiosios spinduliuotės biologinio poveikio svarbiausia savybė — didelės jos dozės slopina gyvojo organizmo ląstelių augimą ir dalijimąsi. Būtent tuo grindžiamas onkologinių ligonių gydymas.

Nejonizuojančioji ilgabangė elektromagnetinė spinduliuotė, skirtingai negu jonizuojančioji, gali sukelti organizme šiluminius pokyčius (kyla žmogaus kūno temperatūra, koaguliuoja baltyminės medžiagos ir t. t.), o tam tikrų bangos ilgių nejonizuojančioji elektromagnetinė spinduliuotė — nervų, širdies ir kraujagyslių bei kai kurių kitų organų ligas.

Vidinė ir išorinė, sugertoji ir lygiavertė dozės

Jonizuojančiosios spinduliuotės apšvitos dozė gali būti dvejopa: išorinės apšvitos dozė dėl esančių atmosferos ore ir nusėdusių ant įvairių paviršių radionuklidų ir vidinės apšvitos dozė dėl radioaktyviųjų medžiagų, patekusių į žmogaus organizmą su maistu, kvėpuojant arba betarpiškai pro odą. Išorinės jonizuojančiosios spinduliuotės poveikį galima nutraukti bet kuriuo metu, pavyzdžiui, perkeliant žmones gyventi į kitą vietą. Tuo tarpu vidinė apšvita trunka tol, kol radioaktyviųjų medžiagų, vykstant medžiagų apykaitai, yra žmogaus organizme. Be to, alfa ir beta dalelės, kurios yra mažiau pavojingos vertinant išorinės dozės dydį, yra ypač pavojingos vidinės apšvitos atveju.

Išorinę jonizuojančiosios spinduliuotės dozę galima palyginti nesunkiai išmatuoti prietaisais — dozimetrais. Vidinė dozė vertinama daugiausia netiesioginiais skaitmeniniais metodais. Juos taikant, būtina žinoti izotopų migracijos žmogaus organizme dėsningumus. Tiesioginiams matavimams

skirti žmogaus kūno jonizuojančiosios spinduliuotės spektrometrai yra labai sudėtingi ir brangūs. Tačiau ir vidinės, ir išorinės apšvitos biologinis poveikis — tai gyvojo audinio atomų ir molekulių sužadinimas, kuriam suvartojama jonizuojančiosios spinduliuotės energija. Šios suvartotos energijos kiekybinis įvertinimas ir yra apšvitos dozė.

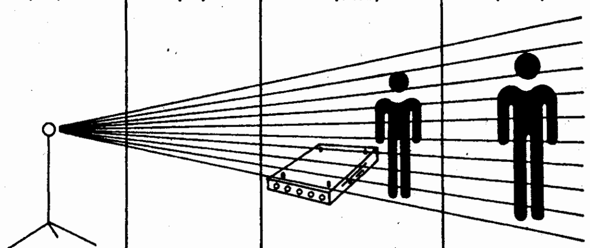
Sugertoji dozė (anksčiau ji buvo vadinama absorbuotąja) — tai kūno sugertos energijos kiekis, tenkantis masės vienetui. Matavimo vienetas — grėjus (pagal anglų fiziko L. H. Grėjaus (L. H. Gray) pavardę), sutrumpintai žymimas Gy. Sugertosios dozės galia — tai per laiko vienetą sugertos energijos kiekis.

Lygiavertė dozė (anksčiau buvo vadinama ekvivalentine) — tai ta pati sugertoji dozė, tik patikslinta priklausomai nuo jonizuojančiosios spinduliuotės poveikio. Pavyzdžiui, alfa dalelės vidinės dozės atveju yra daug pavojingesnės už beta daleles ir gama spindulius, todėl įvedamas soorinis jonizuojančiosios spinduliuotės daugiklis. Jis, pavyzdžiui, alfa dalelėms yra lygus 20, o beta dalelėms ir gama spinduliams — 1. Taigi lygiavertė dozė yra lygi sugertajai dozei, padaugintai iš soorinio jonizuojančiosios spinduliuotės daugiklio. Matavimo vienetas — zyvertas (pagal švedų fiziko R. Zyverto pavardę). Sutrumpintai žymima Sv.

Kadangi jonizuojančiosios spinduliuotės poveikis įvairioms žmogaus kūno dalims yra skirtingas, įvedama **efektinės dozės** sąvoka. Jos įvertinimui taikomi eksperimentų nustatyti daugikliai. Pavyzdžiui, kaulų čiulpams ir plaučiams — 0,12, skydliaukei — 0,03.

Palyginti didelės vieno Gy ir vieno Sv dozės aptinkamos retai. Paprastai vartojami jų pavadinimai su priešdėliais: centi — šimtoji dalis (10^{-2}, žymima raide c), mili — tūkstantoji dalis (10^{-3}, žymima raide m), mikro — milijonoji dalis (10^{-6}, žymima μ).

	Šaltinis	Laukas	Dozė	
			Gyvi ir negyvi objektai	Gyvi organizmai
	Aktyvumas	Ekspozicinė dozė	Sugertoji dozė	Lygiavertė dozė
Nauji vienetai	bekerelis (Bq)		grėjus (Gy)	zyvertas (Sv)
Senieji vienetai	kiuris (Ci)	rentgenas (R)	radas (rad)	remas (rem)



26 pav.
Jonizuojančiosios spinduliuotės šaltinio ir ekspozicinės, sugertosios bei lygiavertės dozės samprata

Išvardyti vienetai priklauso SI sistemai, kuri buvo patvirtinta 1960 m. lapkričio mėn. Generalinėje matų ir svarsčių asamblėjoje. Seniau vartoti vienetai (rentgenas, remas, radas ir kt.) pasaulyje dabar jau retai tevartojami.

Lietuvoje ekspozicinės dozės matavimo vieneto — rentgeno dar neatsisakoma, pavyzdžiui, skelbiant duomenis apie išorinės apšvitos dydį per radiją ir televiziją.

Ekspozicinė dozė rodo ne žmogaus kūno, bet atmosferos oro jonizacijos dydį, todėl neatspindi tikrojo jonizuojančiosios spinduliuotės poveikio žmogui. Matavimo vienetas — rentgenas (pagal anglų fiziko V. Rentgeno (V. Röntgen) pavardę). Sutrumpintai žymima R.

Kada ekspozicinės dozės ir jos matavimo vieneto rentgeno atsisakysime Lietuvoje?

Reikia pripažinti, kad įsiminti dozių matavimo vienetus yra gana sunku. Todėl 26 paveiksle vaizduojamas jonizuojančiosios spinduliuotės šaltinio aktyvumo ir dozių ryšys. Šiuo metu vartojamų sisteminių ir anksčiau vartotų matavimo vienetų aprašymas pateikiams I lentelėje (žr. p. 97).

Atominės elektrinės ir jų avarijos

Trumpai apie jonizuojančiosios spinduliuotės gamtinį foną.

AE ir jų avarijos. ČAE avarijos priežastys. Kuo paaiškinama radionuklidų įvairovė po AE avarijų.

Jonizuojančioji spinduliuotė, sąlygojanti gamtinį radiacinį foną, nėra naujas veiksnys mūsų planetoje. Per visą savo evoliuciją gyvybė dėl kosminių spindulių ir gamtinėje aplinkoje esančių radioaktyviųjų medžiagų visuomet buvo jų lydima. Jau mūsų šimtmetyje pradėti naudoti technogeniniai jonizuojančiosios spinduliuotės šaltiniai. Visų pirma — tai medicininėje diagnostikoje dažnai naudojami Rentgeno spinduliai.

Mūsų šimtmečio vidury gamtinėje aplinkoje atsirado dar vienas papildomas jonizuojančiosios spinduliuotės šaltinis — radioaktyviųjų medžiagų iškritos ant žemės paviršiaus po branduolinio ginklo bandymų. Šios iškritos gali būti: lokalinės, per kelias valandas iškrintančios dešimčių kilometrų spinduliu nuo sprogimo epicentro, troposferinės — iškrintančios kelių šimtų ar net tūkstančių kilometrų spinduliu (priklausomai nuo sprogimo galios) ir stratosferinės — tai globalinės iškritos, dėl kurių visos mūsų planetos paviršius užteršiamas radioaktyviosiomis medžiagomis. Tokį radiacinį foną šiuo metu daugiausia sudaro ilgaamžiai radioaktyvieji cezio, stroncio, plutonio ir kai kurie kiti izotopai.

Dar vienas jonizuojančiosios spinduliuotės šaltinis gamtinėje aplinkoje atsiranda po AE avarijų. Per visą AE eksploatavimo istoriją jau įvyko apie 150 įvairaus masto AE avarijų. Dauguma jų likviduotos elektrinės teritorijoje. Tačiau keli atvejai turėjo globalinių padarinių. Visų pirma — tai ČAE avarija, kurios metu į aplinką daugiausia per pirmąsias dešimt parų pateko didelis radioaktyviųjų medžiagų kiekis.

ČAE tipo reaktoriaus konstruktoriai numatė aplinkos apsaugos priemones, kad avarijos metu į ją nepatektų radioaktyviųjų medžiagų. Tačiau vietoje vieno, kitų tipų reaktoriuose naudojamo apsauginio apvalkalo, dažnai vadinamo biologiniu, ČAE reaktoriuose buvo keletas apsauginių avarinių sistemų. Ketvirtajame ČAE bloke avarija įvyko 1986 m. balandžio 26 d. 01 val. 23 min. Tai buvo šiluminis, o ne branduolinis sprogimas. Sugriauta aktyvioji reaktoriaus zona ir dalis pastato.

Balandžio 25 d. reikėjo sustabdyti reaktorių ir atlikti kai kuriuos profilaktinius remonto darbus bei ištirti vieną turbogeneratorių ypatingomis sąlygomis: kaip jis veikia netiekiant vandens garų. Turbogeneratoriaus tyrimo programą sudarė ne branduolinės, o šiluminės energetikos specialistas. Juk buvo tiriamas turbogeneratorius, o ne reaktorius. Šis darbuotojas, neaptaręs programos su specialistais, savo nuožiūra, apėjo kabinetus ir po vieną surinko būtinus viršininkų parašus, leidžiančius atlikti tokį eksperimentą. Nieko apie jį nežinojo AE direktorius, vakarinės pamainos viršininkas, valstybinės priežiūros inspekcijos darbuotojai, kurie visi drauge būtent tą dieną buvo nusiųsti tikrintis sveikatos dėl kenksmingų darbo sąlygų. Programoje nebuvo nurodyta, kad turbogeneratoriaus darbą reikia tirti sustabdžius reaktorių. Buvo leista išjungti avarinę šaldymo sistemą ir t. t. Be to, ir pats pamainos personalas eksperimentui buvo blogai parengtas.

Kaip gi klostėsi įvykiai vykstant eksperimentui?

Balandžio 25 d. 01 val. 00 min., rengiant reaktorių remonto ir profilaktikos darbams, pradėta mažinti jo galią.

14 val. 00 min. pagal parengtą programą buvo išjungta avarinė šaldymo sistema. Šiuo atveju reaktoriaus darbas turėjo būti sustabdytas, tačiau tą dieną dispečeris neleido jo stabdyti, nes netikėtai įvyko nedidelė avarija šiluminėje elektrinėje, dėl to vieningoje energetinėje sistemoje trūko elektros energijos.

23 val. 10 min. buvo gautas leidimas pradėti stabdyti reaktorių. Jo galia buvo laipsniškai mažinama, kaip numatyta programoje. Tačiau operatorius nesuvaldė reaktoriaus ir jo galia sumažėjo beveik iki nulinio lygio. Tokiais atvejais reaktorius tuoj pat turi būti stabdomas, bet personalas pradėjo jo galią didinti, norėdamas tiksliai įvykdyti tyrimų programą.

26 d. 01 val. 20 min. reaktoriaus galiai didinti iš aktyviosios jo zonos pakeliami reaktoriaus darbą reguliuojantys strypai. Operatorius nusižengė

griežčiausiam reikalavimui: reaktoriaus aktyviojoje zonoje paliko du kartus mažesnį už kritinį strypų skaičių. Ir vėl reaktorius turėjo būti skubiai sustabdytas.

01 val. 20 min. 04 sek. pradėta tirti turbogeneratoriaus darbinius parametrus. Jo išjungimo momentu turėjo įsijungti dar viena automatinė avarinė sistema. Operatoriai tai žinojo ir, kad nereikėtų reaktoriaus stabdyti, ją išjungė. Reaktoriaus darbiniai parametrai ėmė staigiai kisti.

01 val. 23 min. 40 sek. naktinės pamainos viršininkas, supratęs susidariusios padėties grėsmę, liepė įjungti efektyviausią avarinę sistemą, bet ji veikė tik iš dalies. Įvyko šilumis sprogimas, tiksliau — du, sekę vienas po kito. Į aplinką pateko didelis radioaktyviųjų medžiagų kiekis.

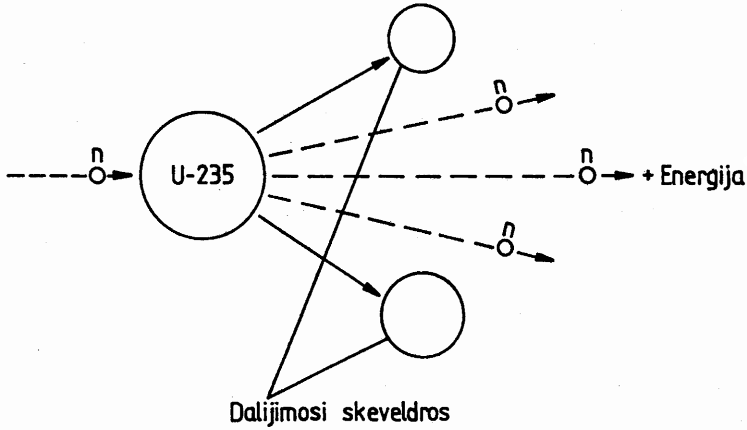
Apskritai ČAE ketvirtojo bloko avarinė sistema buvo tokia, kad vien tik veikiant automatiniams įrenginiams, visai nedalyvaujant žmogui, buvo galima išvengti didesnių avarijų. Tačiau to tipo reaktorių konstruktoriai nenumatė tokios apsauginės sistemos, kuri padarytų neįmanomą nelogišką eksploatacijos taisyklių pažeidimą. O ČAE viskas atsitiko būtent taip. Po šios avarijos kituose tokio tipo reaktoriuose šie trūkumai pašalinti.

Pasikeitus Rusijos visuomeninei santvarkai, pamažu kito ir požiūris į ČAE avarijos priežastis. Pradėtas naujas teismo procesas, nes, tiriant kontroliuojančių prietaisų rodmenis, nustatyta, kad kai kurie reaktoriaus konstrukcijos ypatumai, o ne operatorių veiksmai galėjo būti avarijos priežastis. Naujojo teismo metu ir bus nagrinėjama, ar šio reaktoriaus konstruktoriai atsižvelgė į visas radiacinės apsaugos nuostatas.

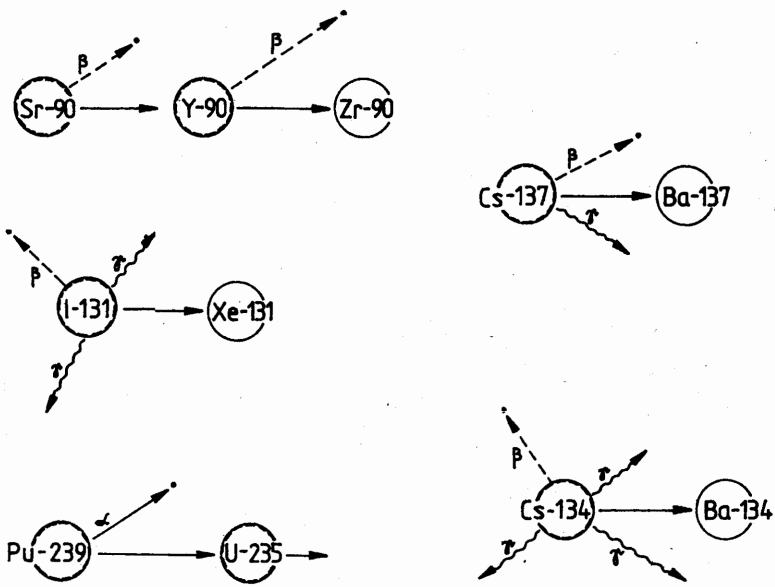
Šiuose puslapiuose gana daug kartų buvo paminėta reaktoriaus sąvoka, todėl būtina priminti šio įrenginio paskirtį AE. Galima įsivaizduoti, kad AE reaktorius yra šiluminės elektrinės dalis, kurioje deginamos dujos, mazutas ir t. t. Tik jame šiuo metu vietoje tradicinio kuro naudojamas kito tipo kuras. Sodrinto urano tabletės dedamos į specialių metalo lydinių vamzdžius, vadinamuosius šelus (šiluminius elementus), kuriuose ir vyksta savaiminė urano dalijimosi reakcija, lydima šilumos išsiskyrimo (27 pav.). ČAE ketvirtojo bloko reaktoriuje avarijos metu buvo apie 180 t ^{238}U įsodrinto ^{235}U.

Dažnai visiškai rimtai klausiama: kam gi tada AE reikalingi 100 m aukščio kaminai? Kaip visiems gerai žinoma, šiluminėje elektrinėje jie reikalingi nevisiškojo degimo produktams išsklaidyti aplinkoje, o AE — taip pat išsklaidyti aplinkoje kai kurioms dujinėms medžiagoms, susidarančioms veikiant reaktoriui, pavyzdžiui, radioaktyviosioms inertinėms dujoms: ^{41}Ar, ^{85}Kr, ^{133}Xe.

Urano dalijimosi metu susidaro dalijimosi skeveldros — radioaktyvieji arba stabilieji izotopai, kurių masės skaičius kinta nuo 80 iki 150. Radionuklidai tokie įvairūs ir dėl to, kad, išspinduliavę kurią nors dalelę,



27 pav.
^{235}U dalijimosi reakcijos schema: veikiamas neutrono, urano branduolys pasidalija į skeveldras (naujus radioaktyviuosius arba stabilius atomus), papildomai susidaro keli neutronai (pažymėta „*n*") ir energijos perteklius, vartojamas AE kaip šiluminės energijos šaltinis

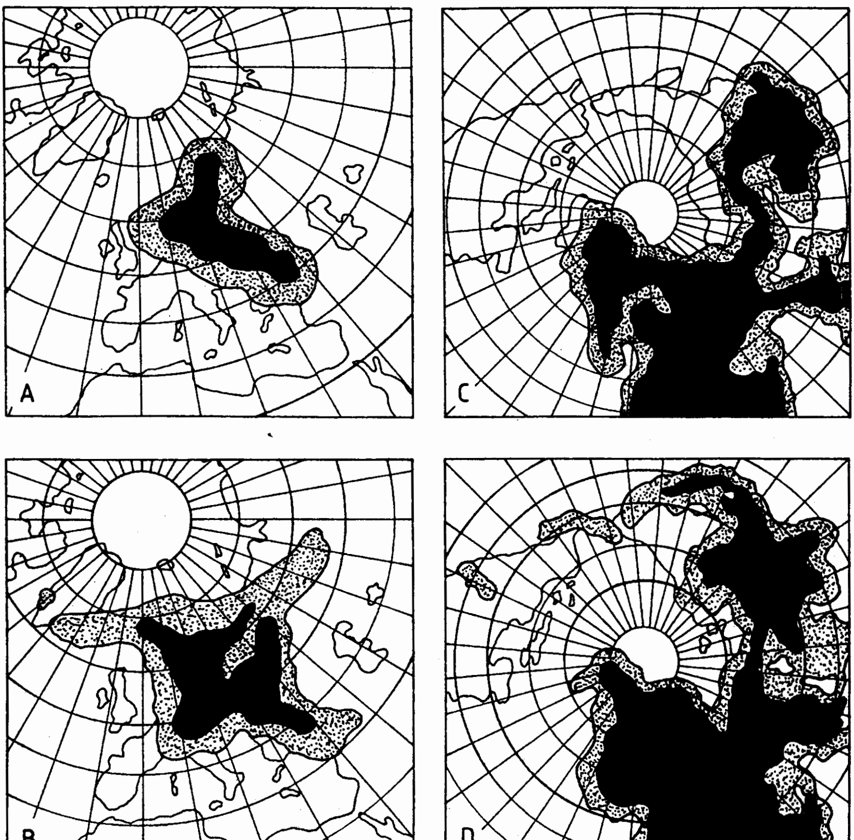


28 pav.
Kai kurių radionuklidų (urano dalijimosi skeveldrų), po ČAE avarijos patekusių į aplinką, tolesnio skilimo grandinėlės: ◎ — radioaktyvieji izotopai (α — alfa dalelės, β — beta dalelės, γ — gama spinduliai), ○ — stabilieji izotopai

o kartu ir energijos perteklių gama kvanto pavidalu, jie virsta kitais radioaktyviaisiais arba stabiliaisiais nuklidais (28 pav.).

II lentelėje pateikti duomenys apie biologiniu požiūriu svarbiausių radioaktyviųjų izotopų kiekį, kuris pateko į aplinką po ČAE avarijos (žr. p. 98). Įvertinti jos mastui čia lyginami radionuklidų kiekiai, patekę į aplinką per kitas didžiausias branduolines avarijas.

Dar viena ČAE avarijos ypatybė — daug dalijimosi produktų sprogimo metu pateko į kelių kilometrų aukštį ir oro tėkmių pagauti greitai pasklido visame Šiaurės pusrutulyje (29 pav.).



29 pav.
^{131}I pasiskirstymas Šiaurės pusrutulyje pažemio oro sluoksnyje (apskaičiuota pagal meteorologinį matematinį modelį): *A* — 1986 04 27, *B* — 1986 04 29, *C* — 1986 05 01, *D* — 1986 05 04. Didesnis kaip 1 Bq/m^3 ^{131}I aktyvumas ore pažymėtas juodai, o nuo 10^{-4} Bq/m^3 iki 1 Bq/m^3 — taškeliais

1990 m. Tarptautinės atominės energijos agentūros (IAEA) ekspertai patvirtino Tarptautinę branduolinių avarijų skalę. Išskirti 7 avarijų lygiai.

1 lygis — sutrikęs AE veikimas, 2 lygis — įvykis. Abu šie lygiai susieti su techninio pobūdžio gedimais. Avarijos pasekmės pašalinamos AE teritorijoje. Radioaktyviosios medžiagos į aplinką nepatenka.

3 lygis — pavojingasis įvykis, kai radioaktyviosios medžiagos patenka į aplinką (viršija normatyvuose numatytus leistinus lygius); didžiausios žmonių apšvitos dozės yra dešimtųjų milizyverto dalių eilės.

4 lygis — AE avarija sugedus įrangai, kai radioaktyviosios medžiagos patenka į aplinką. AE personalo apšvitos dozės gali būti 1 Sv eilės, gyventojų — siekti keletą milizyvertų.

5 lygis — AE avarija, galinti turėti pavojingų padarinių, kai į aplinką patenka nuo šimtų iki tūkstančių TBq ^{131}I (1 TBq = 10^9 Bq); būtina iš dalies įgyvendinti valstybinį avarijos padarinių likvidavimo planą.

6 lygis — pavojingoji avarija, kai į aplinką patenka nuo tūkstančio iki dešimčių tūkstančių TBq ^{131}I; būtina įgyvendinti visą valstybinį avarijos padarinių likvidavimo planą.

7 lygis — didžioji avarija, kai, suirus branduoliniam reaktoriui, į aplinką patenka didelis ilgaamžių ir trumpaamžių izotopų kiekis, tarp jų daugiau kaip šimtas tūkstančių TBq ^{131}I; radionuklidai pasklinda už valstybinių sienų tos šalies, kurioje įvyko avarija, o avarijos padariniai gali turėti itin žalingą poveikį žmonių sveikatai.

Pavyzdžiui, Three Mile Island įvykusi avarija (1979 m.) buvo 5 lygio, ČAE (1986 m.) — 7 lygio, Sankt Peterburgo AE (1991 m.) — 3 lygio.

Laikotarpis po AE avarijų paprastai skirstomas į šias fazes:

1. Ankstyvoji fazė trunka nuo avarijos pradžios iki radioaktyviųjų medžiagų išmetimo į aplinką pabaigos ir radioaktyviosios taršos lygių nustatymo. Tuo metu vyrauja trumpaamžiai radionuklidai, visų pirma radioaktyvieji jodo izotopai. Šio periodo trukmė — nuo kelių valandų iki keliolikos parų.

2. Tarpinė (vidurinioji) fazė trunka nuo ankstyvosios fazės galo iki visų apsaugos priemonių taikymo pabaigos. Šis periodas tęsiasi dažniausiai apie metus.

3. Vėlyvoji (atstatomoji) fazė tęsiasi nuo tarpinės fazės pabaigos iki tol, kol paskelbiama, kad panaikinami visi gyventojų ūkinės ir kitokios veiklos apribojimai.

Tolesniuose skyreliuose ir aptarsime šias fazes po AE avarijų, prisimindami ir ČAE avarijos padarinius Lietuvoje.

Ankstyvoji ir tarpinė fazė po AE avarijų — „radioaktyviojo jodo periodas"

Radioaktyvieji jodo izotopai po AE avarijų. Jodo migracijos gamtinėje aplinkoje dėsningumai: ciklas oras — paklotinis paviršius — maisto produktai — žmogus.
Jodo apykaita žmogaus organizme. Skydliaukės radiacinės apsaugos priemonė — jodo profilaktika.
Radioaktyvieji jodo izotopai Lietuvoje po ČAE avarijos.

Patekęs į žmogaus organizmą, radioaktyvusis jodas, taip pat kaip ir stabilusis, koncentruojasi skydliaukėje (priekinėje kaklo dalyje esančiame mažame drugio formos organe), greitai įsijungia į medžiagas, kurios reguliuoja fiziologinius žmogaus organizme vykstančius procesus. Tarp radioaktyviųjų jodo izotopų labai svarbus yra ^{131}I, kurio pusamžis yra 8,04 paros. Pastaruoju metu nustatyta, kad nemažai skydliaukę apšvitina ir kiti, trumpiau gyvenantys jodo izotopai — ^{132}I, ^{133}I ir kt.

Iškart po AE avarijos, slenkant radioaktyviųjų medžiagų debesiui, jodo izotopai patenka į žmogaus organizmą per kvėpavimo takus ir betarpiškai pro kūno odą. Įkvėpus oro, kuriame yra jodo izotopų, jau po kelių minučių nemažai jų atsiranda kraujyje. Priklausomai nuo radioaktyviojo jodo formos (aerozolinės ar dujinės) plaučiuose jo sulaikoma nuo 50 % iki 100 %.

Daugelis radionuklidų, ypač radioaktyviųjų jodo izotopų, slenkant debesiui, iš oro nusėda ant įvairių paviršių, dėl to žmonės apšvitinami iš išorės. Jodo izotopai nusėda ant žemės paviršiaus, taip pat ir ant ganyklų žolės, po to su gyvūninės kilmės maisto produktais (daugiausia pieno produktais) ir atvirame grunte augusiomis lapinėmis daržovėmis patenka į žmogaus organizmą. Nustatyta, kad daugiausia radioaktyviojo jodo būna liesose pieno frakcijose (išrūgose, pasukose) ir mažiausiai — riebiose (svieste, grietinėje).

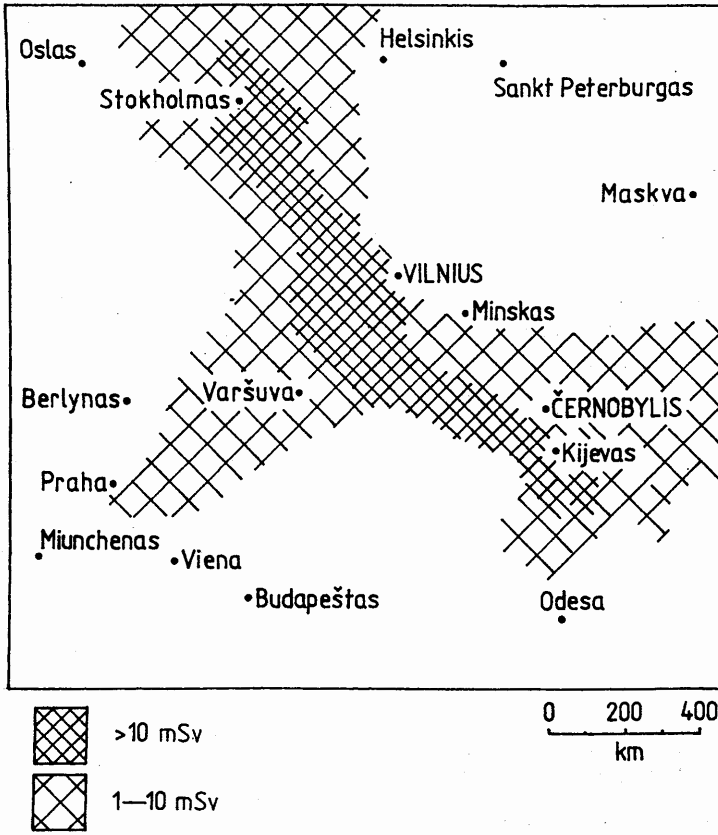
Nuo radioaktyviųjų jodo izotopų galima apsisaugoti dviem būdais:

1) saugantis, kad radioaktyviųjų jodo izotopų, kartu ir kitų radionuklidų, kuo mažiau patektų ant kūno odos, rūbų, kad kuo mažiau jų būtų gaunama kvėpuojant, taip pat su maistu (tikslesnis aprašymas 1 priede);

2) taikant jodo profilaktiką, saugančią skydliaukę nuo radioaktyviųjų jodo izotopų, t. y. ją prisotinant stabiliojo jodo tiek, kad ji negalėtų pasisavinti radioaktyviojo jodo (tikslesnis aprašymas 2 priede).

Kas gi vyko Lietuvoje 1986 m. pavasarį?

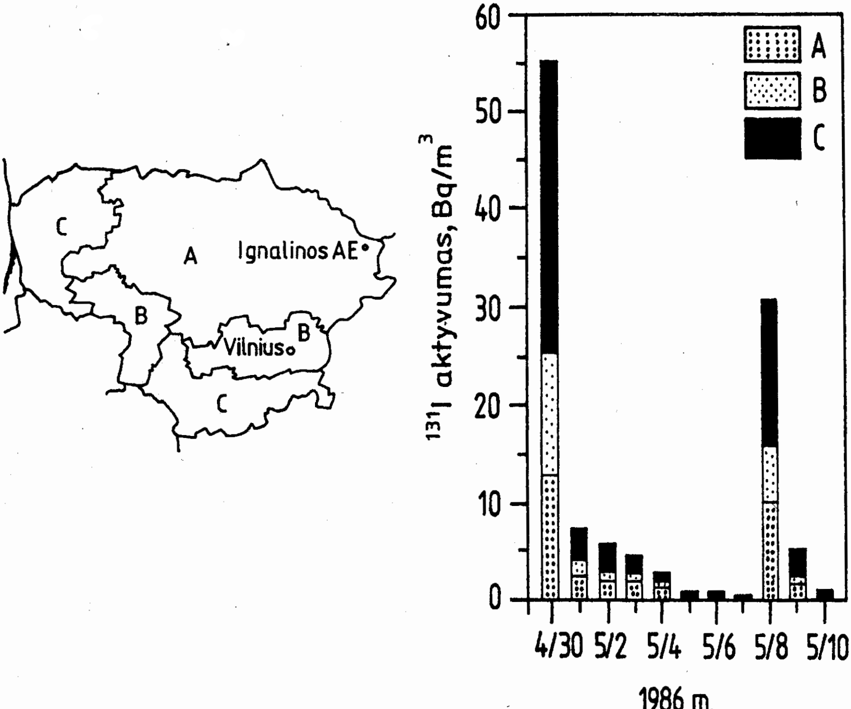
Kad padėtis buvo grėsminga, matoma 30 paveiksle. Iškart po avarijos radioaktyviųjų jodo izotopų prisodrinta oro masė, mažai besikeisdama, siauro fakelo pavidalo, slinko anticiklono pakraščiu šiaurės vakarų kryptimi. 30 paveiksle tankiau subrūkšniuotoje teritorijoje reikėjo skubiai atlikti jodo profilaktiką.



30 pav.
Suaugusių žmonių skydliaukės ^{131}I sugertųjų dozių po ČAE avarijos, 1986 04 26 — 05 21 laikotarpiu, prognozė. Skaičiavimai atlikti 1986 m. JAV Lourenco Livermoro nacionalinėje laboratorijoje (Lawrence Livermore National Laboratory) padidėjusios skydliaukės ligų rizikos zonai nustatyti

Žinia apie ČAE avariją ir susidariusią grėsmingą padėtį atėjo į Lietuvą pavėluotai. Daugybės Lietuvos žmonių pastangomis 1986 m. gegužės mėnesio pirmosiomis dienomis respublikos teritorijoje nustatyti ^{131}I aktyvumo ore eiga, pasiskirstymo ganyklų žolėje ir piene dėsningumai (31 pav.). Reikia pabrėžti, kad radioaktyvusis jodas atmosferos ore buvo daugiausia dujinis, o ne aerozolinis, todėl paprasti respiratoriai arba sudrėkintos medžiagos sluoksniai negalėjo apsaugoti, kad jo nepatektų į žmogaus organizmą.

Ypatingą dėmesį reikėtų atkreipti į teritorinį ^{131}I aktyvumo piene pasiskirstymą Lietuvoje. Buvo išskirtos trys taršos zonos. Mažesnio aktyvumo zonoje ^{131}I pasiskirstymas buvo gana tolygus, o didžiausios taršos zonoje,



31 pav.
^{131}I tūrinio aktyvumo kaita Lietuvoje po ČAE avarijos: kairėje — pieno tarša ^{131}I *(A* — pieno tarša neviršijo didžiausių leistinų lygių, *B* — neviršijo Europos Ekonominės Bendrijos šalyse priimtų leistinų lygių, *C* — leistini lygiai buvo viršyti); dešinėje — ^{131}I tūrinio aktyvumo kaita atmosferos ore Vilniuje

kur maksimalios ^{131}I aktyvumo vertės labai viršijo leistinas, aktyvumo lygiai gretimuose rajonuose galėjo smarkiai skirtis. Gegužės pabaigoje dėl palyginti trumpo ^{131}I pusamžio pienas daugelyje respublikos rajonų jau buvo tinkamas vartoti.

Turint šiuos duomenis, galima įvertinti lygiavertę dozę, skydliaukės sugertą dėl ^{131}I jonizuojančiosios spinduliuotės Lietuvoje. Labiausiai užterštoje zonoje šios dozės dydis galėjo siekti kūdikių — 0,1 Sv, vaikų — 0,025 Sv, suaugusiųjų — 0,013 Sv, jeigu jie vartojo užterštą pieną (nesuderinusi su Maskva, Sveikatos apsaugos ministerija savo iniciatyva uždraudė vaikams vartoti ^{131}I užterštą pieną ir padarė viską, kas buvo įmanoma, kad aprūpintų juos švariu). Oru su ^{131}I kvėpavome visi. Palyginimui galima pateikti tokius duomenis. Kontroliuojamoje 30 km zonoje apie ČAE 48 % vaikų gauta lygiavertė dozė skydliaukėje siekė 0,3 Sv.

Šiuo metu sudėtinga tiksliai prognozuoti galimas skydliaukės ligas, nes tam reikia įvertinti daug veiksnių: skydliaukėje sugertos lygiavertės dozės

dydį, žmogaus amžių, lytį, genotipą, stabilaus jodo organizme pakankamumą ir t. t. Remiant Atviros Lietuvos fondui bei Sveikatos apsaugos ministerijai, tokie darbai Lietuvoje jau atliekami.

Ir šio skyrelio pabaigoje dar kartą grįžkime į 1986 m. Turimi duomenys rodo, kad jodo profilaktiką tikslinga buvo taikyti daugiausia ^{131}I užterštoje pietinėje ir vakarinėje Lietuvos dalyje. Apie visų minėtų radiacinės apsaugos priemonių svarbą ir efektyvumą liudija duomenys, gauti Vengrijoje (32 pav.), kur jos buvo taikytos.

Vėlyvoji fazė po AE avarijų. Ilgaamžiai radionuklidai

Netikėta staigmena — netolygus radioaktyviųjų iškritų pasiskirstymas po ČAE avarijos. „Karštosios dėmės" ir „karštosios teritorijos".

Ar buvo atmosferoje ir ant žemės paviršiaus „karštųjų dalelių" po ČAE avarijos?

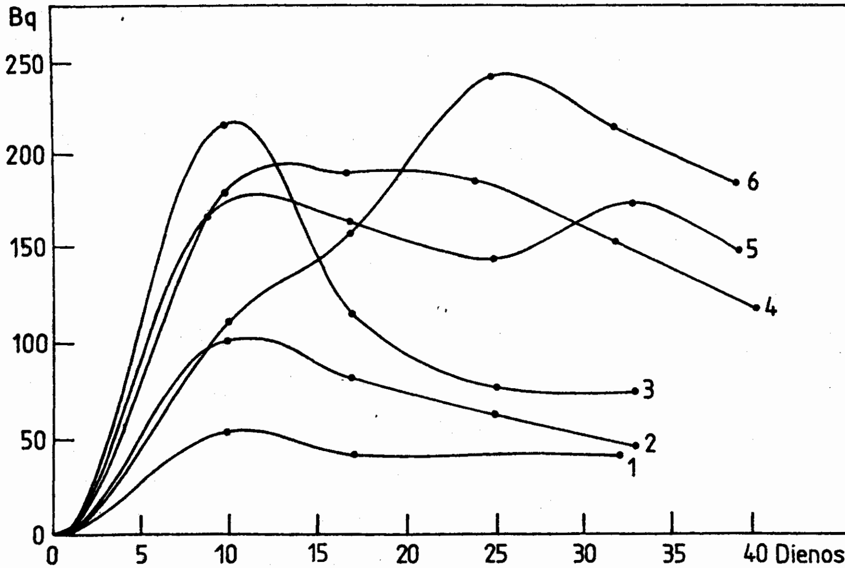
Miškai — labiausiai užteršta teritorijos dalis. Grybų ir uogų radioaktyvumas.

Ar dideles ilgaamžių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės apšvitos dozes gavo žmonės Vakarų Europoje ir Lietuvoje?

„Karštosios dėmės", „karštosios teritorijos" ir „karštosios dalelės"

Po ČAE avarijos netoli nuo Žemės paviršiaus (palyginti su branduoliniais sprogimais, kai radioaktyviosios medžiagos pakyla labai aukštai ir išsisklaido globaliniu mastu) į aplinką pateko dideli ilgaamžių radionuklidų kiekiai. Biologiniu požiūriu svarbiausi iš jų radioaktyvieji cezio, stroncio ir plutonio izotopai.

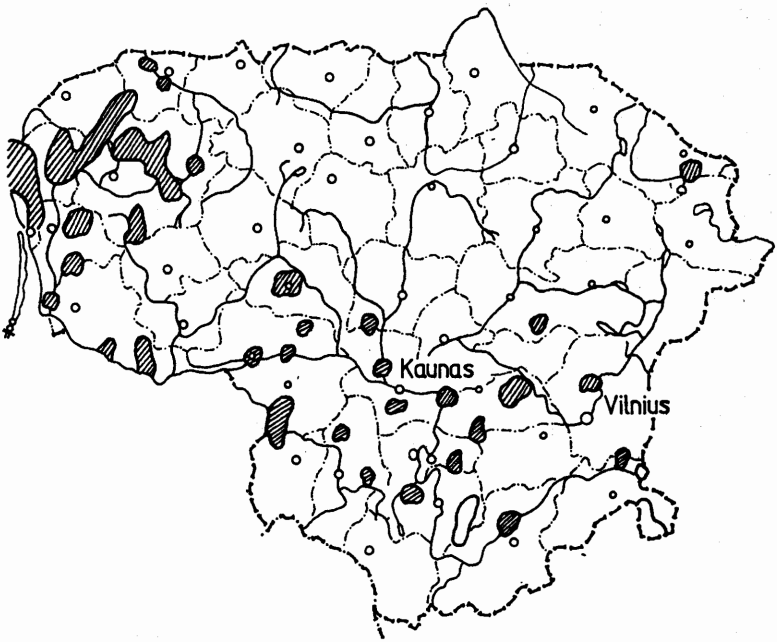
Netikėta buvo tai, kad, nagrinėjant ČAE avarijos padarinius, nustatyta dėmėtoji radionuklidų iškritų ant žemės paviršiaus sandara — rasta „karštųjų dėmių". Tokios „karštosios dėmės" nedidelės ploto dalies nuotrauka Baltarusijos Respublikos teritorijoje, padaryta iš lėktuvo maždaug 100 m aukštyje nuo Žemės paviršiaus specialiu radioaktyviųjų izotopų, spinduliuojamų gama spindulių matavimo prietaisu, parodyta 33 paveiksle. Tamsesne spalva pažymėtos vietovės, kurios turi didesnį kiekį radioaktyviųjų medžiagų, kartu spinduliuoja daugiau jonizuojančiųjų gama spindulių. Matome, kad ir „karštosiose dėmėse" yra palyginti švarių vietų, bet, paėjus kelis šimtus metrų, o kartais tik kelis žingsnius kuria nors kryptimi, galima patekti į užterštą vietą ir sugerti didelę jonizuojančiųjų spindulių dozę. Iki ČAE avarijos manyta, kad radioaktyvosios iškritos ant Žemės paviršiaus pasiskirsto tolygiai.



32 pav.
[131] I aktyvumo kaita vaikų skydliaukėje priklausomai nuo taikytų radiacinės apsaugos priemonių (Vengrija):
1 — namų režimas, kruopščiai parenkamas maistas;
2 — daug laiko buvo atvirame ore, maistas parenkamas;
3 — pavėluotai taikyta jodo profilaktika;
4, 5, 6 — nebuvo taikytos jokios priemonės



33 pav.
Iškritusių ant žemės paviršiaus radioaktyviųjų medžiagų spinduliuojamų gama spindulių nuotrauka iš lėktuvo „karštojoje dėmėje" (10 km × 12 km) Baltarusijos teritorijoje (kuo tamsesnės dėmės, tuo didesnis radionuklidų kiekis)



34 pav.
Lietuvos teritorijoje iškritusių ant žemės paviršiaus radioaktyviųjų medžiagų spinduliuojamų gama spindulių nuotrauka iš lėktuvo. Tamsiau pažymėtoje teritorijoje iškritų tankis ne didesnis kaip 5500 Bq/m^2 (0,1 Ci/km^2). Matavimai atlikti 1986 m. rudenį Lietuvos hidrometeorologinės valdybos iniciatyva

Panaši Lietuvos teritorijos nuotrauka iš lėktuvo parodyta 34 paveiksle. Iškritų laukas nevienalytis, yra šiek tiek aktyvesnių dėmių, tačiau Lietuvos teritorijoje ir šiose dėmėse ilgaamžių cezio izotopų aktyvumas buvo ne didesnis kaip 5 500 Bq/m^2 (0,1 Ci/km^2). Šios „karštosios dėmės" toliau detaliai tiriamos Fizikos institute. Manoma, kad, tiriant Lietuvos teritorijos užterštumą radioaktyviosiomis medžiagomis, bus atskleista nemažai paslapčių, bus jų ir Sovietų armijos paliktuose poligonuose (pavyzdžiui, Zoknių aerodrome rastos palaidotos radioaktyviosios atliekos).

Fizikos instituto laboratorijose po ČAE avarijos nustatytos ypatingos „karštosios dėmės" ežerų pakrantėse 1—1,5 m atstumu nuo kranto linijos. Manoma, kad jos susidaro bangoms į krantą išmetant ant ežero iškritusius paviršinėje vandens plėvelėje susikaupusius radioaktyviuosius izotopus. Tokių „karštųjų dėmių" pirmaisiais po ČAE avarijos metais Lietuvoje aptikta Sūduvos aukštumose netoli Kalvarijos (Orijos ežeras), Tauragės rajone (Reketijos ežeras), Lazdijų rajone (Skaistgirio ežeras), o mažesnio aktyvumo — Trakų rajone (Baltasis ežeras) ir kt.

Atmosferoje esančios arba ant Žemės paviršiaus nusėdusios radioaktyviosios dulkės vadinamos „karštosiomis dalelėmis". Pirmomis po ČAE avarijos dienomis atmosferos ore jų nebuvo daug. Tačiau balandžio 28 ir 29 dienomis, pavyzdžiui, Vilniaus miesto ore jų buvo net 10 000 dalelių viename kubiniame metre atmosferos oro. Vėliau jų kiekis sumažėjo, ir tik gegužės 8 ir 9 dienomis buvo pastebėtas antras maksimumas — 225 dalelės viename kubiniame metre oro. Žinant, kiek oro vidutiniškai žmogus įkvepia per parą, galima nesunkiai apskaičiuoti, kad kiekvienas suaugęs Vilniaus gyventojas tuo metu įkvėpė apie 50 000 tokių „karštųjų dalelių" Laimė, didesnė jų dalis buvo sudaryta iš trumpaamžių izotopų, todėl jos nebuvo itin pavojingos.

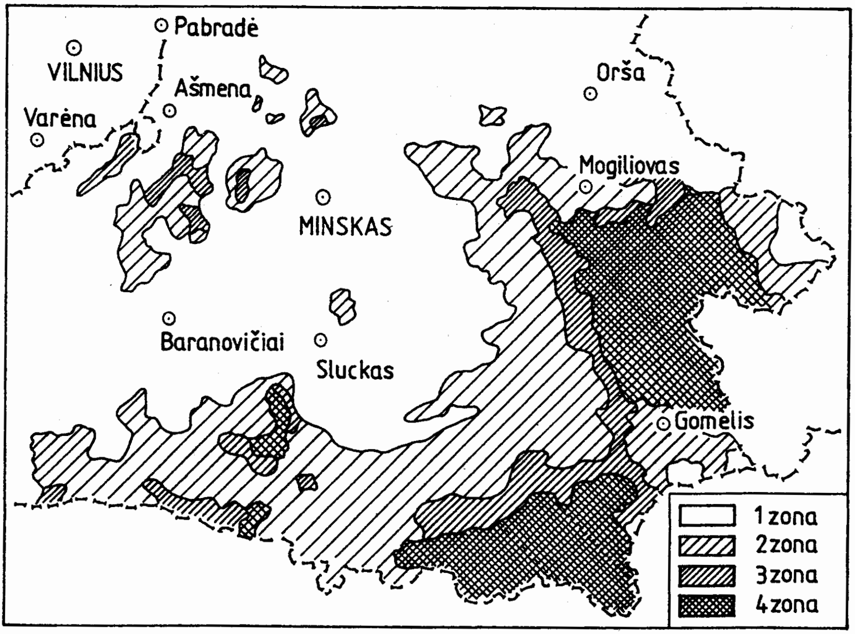
Pavienių, ypač aktyvių „karštųjų dalelių", nusėdusių ant įvairių paviršių (miškuose, laukuose ir kt.), po avarijos buvo dažniau aptinkama pietinėje ir vakarinėje Lietuvos dalyje, t. y. sutapo su didesnės taršos ^{131}I teritorijomis.

Taigi po AE avarijų, vengiant jonizuojančiosios spinduliuotės poveikio „karštosiose dėmėse", įkvėpti „karštųjų dalelių" ir kitų pavojų, reikia daugiau būti uždarose patalpose, sandariai uždarius langus, duris bei ventiliacijos angas. Nevaikščioti po butą ta pačia avalyne, kuri buvo avėta lauke, nenešti į butus gėlių puokščių, kaip kad buvo 1986 m. pavasarį.

Miškai — labiausiai užteršta teritorijos dalis

Labiausiai užteršiami miškai, nes, slenkant radioaktyviųjų medžiagų debesiui, jie tartum filtruoja orą ir sulaiko radionuklidus ant lapų, medžių kamienų ir kitų paviršių. Ant žemės radionuklidų patenka su krintančiais lapais ir spygliais. Lietus juos nuplauna nuo medžių kamienų ir šakų. Todėl miškuose šiuo metu labiausiai užteršta paklotė (organinių medžiagų prisodrintas viršutinis dirvožemio sluoksnis). Dėl to radionuklidais užterštuose miškų plotuose grybiena ir grybai, labai kaupiantys radionuklidus, jais yra užteršti. Šiuo metu — ilgaamžiais radioaktyviaisiais cezio ir stroncio izotopais.

Reikia pabrėžti, kad šie ilgaamžiai radionuklidai Lietuvos miškų dirvožemiuose buvo ir iki ČAE avarijos dėl globalinių iškritų po branduolinio ginklo bandymų. Tačiau radionuklidų sudėtis iki ČAE avarijos ir po jos, kaip matome iš III lentelės, yra skirtinga. Lietuvos miškų visų rūšių grybai radioaktyviąsias medžiagas kaupia maždaug vienodai. Radioaktyviųjų izotopų kiekis labiau priklauso nuo rinkimo vietos ir dirvožemio tipo.



35 pav.
Radioaktyviųjų cezio izotopų iškritų ant žemės paviršiaus po ČAE avarijos pasiskirstymas Baltarusijos teritorijoje:
1 zona — < 37 000 Bq/m² (< 1 Ci/km²);
2 zona — nuo 37 000 iki 185 000 Bq/m² (nuo 1 iki 5 Ci/km²);
3 zona — nuo 185 000 iki 555 000 Bq/m² (nuo 5 iki 15 Ci/km²);
4 zona — > 555 000 Bq/m² (> 15 Ci/km²)

Nevienalytės struktūros ilgaamžių radionuklidų iškritų aptikta ir Baltarusijoje (35 pav.). Vertėtų atidžiai išnagrinėti šiame piešinyje pavaizduotas įvairios taršos zonas Baltarusijos teritorijoje, kurioje ilgaamžių radionuklidų iškritų aktyvumas po ČAE avarijos yra šimtus kartų didesnis negu Lietuvoje, vengti rinkti ir pirkti ten miškų gėrybes.

Grybus, ypač džiovintus, rekomenduotina pirkti turgavietėse, kur jų radioaktyvųjį užterštumą tikrina specialios tarnybos, nes yra buvę atvejų, kai į Lietuvą atvežtų parduoti džiovintų grybų radioaktyvumas siekė šimtus tūkstančių ir netgi milijonus bekerelių kilogramui. Lietuvoje rinktų grybų radioaktyvumas, kaip rodo III lentelė, yra tik nuo dešimties iki tūkstančių bekerelių kilogramui. Užterštus grybus specialios tarnybos konfiskavo ir palaidojo radioaktyviųjų atliekų kapinyne. Be abejo, jie buvo rinkti užterštuose Baltarusijos miškuose arba net negyvenamoje 30 km zonoje apie ČAE.

Labiau radioaktyvios ir rūgščiosios miškų uogos, pavyzdžiui, spanguolės. Lietuvos miškuose rinktų spanguolių radioaktyvumas siekia 100 Bq/kg.

Kadangi tradiciniai Kūčių vakaro valgiai gaminami būtent iš šių produktų, būkime atsargūs! Nepirkime grybų, spanguolių ir kitų miško gėrybių iš atsitiktinių žmonių. Venkime radioaktyviųjų izotopų ant šventinio stalo!

Dažnai klausiama: kaip paruošti grybų patiekalus, kad jie būtų mažiausiai radioaktyvūs? Tik taip, kaip juos gamino mūsų seneliai: prieš vartojimą būtina juos išmirkyti šaltame vandenyje arba išvirti sūdytame ir truputį parūgštintame vandenyje, kuris po to išpilamas, nes netinka maistui.

Išorinė ir vidinė ilgaamžių izotopų jonizuojančiosios spinduliuotės apšvitos dozės po ČAE avarijos Lietuvoje

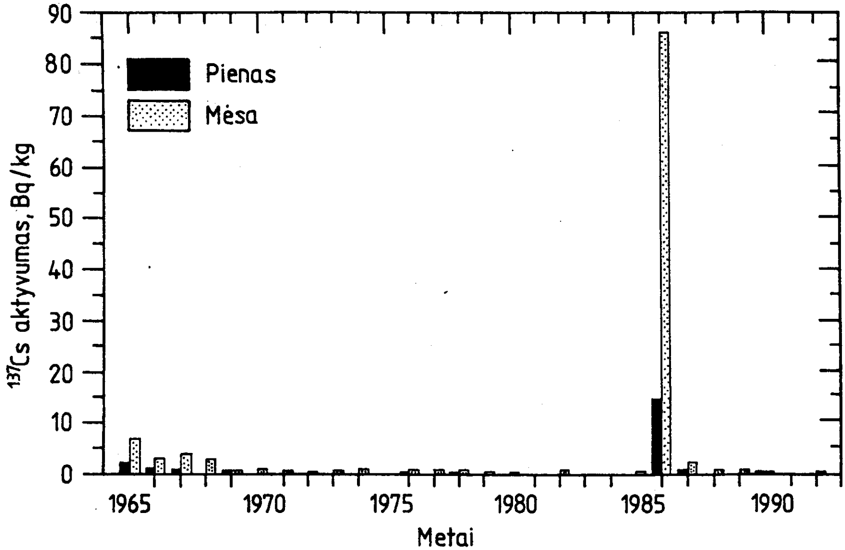
Čia paminėtos tik kai kurios ilgaamžių radionuklidų sklidimo gamtinėje aplinkoje ypatybės po ČAE avarijos. Tačiau svarbiausia žinoti žmonių sugertųjų išorinių ir vidinių dozių dydžius, o kartu įvertinti ilgaamžių radionuklidų (Lietuvoje pastebėta daugiausia radioaktyviųjų cezio izotopų) jonizuojančiosios spinduliuotės po ČAE avarijos poveikį žmonių sveikatai.

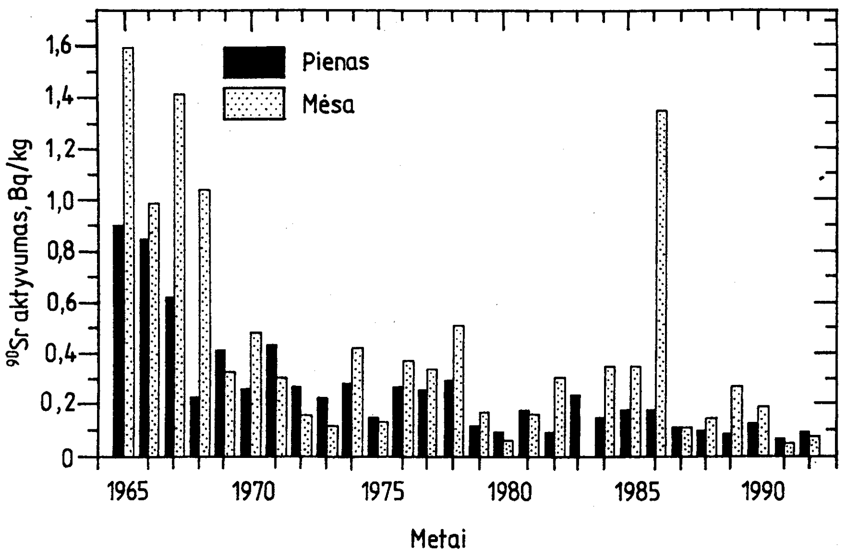
Didžiausia išorinė apšvita buvo 1986 m. balandžio 29 ir 30 dienomis. Tuo metu ji apie 20 kartų viršijo foninį lygį, kuris Lietuvoje vidutiniškai yra 10 μR/h. Kaip jau minėta, šios išorinės dozės Lietuvoje matuojamos ne tarptautiniu, o pasenusiu ekspozicinės dozės vienetu — rentgenu valandai (po ČAE avarijos matavimai buvo atliekami tokiais pat vienetais graduotais prietaisais). Šį matavimo vienetą vartojame ligi šiol, kasdieną skelbdami duomenis apie išorinės jonizuojančiosios spinduliuotės lygį per radiją ar TV laidas. Kitomis dienomis po avarijos išorinis jonizuojančiosios spinduliuotės dozė buvo ne didesnė kaip 30 μR/h (leistina riba ilgalaikiam žmonių gyvenimui užterštoje teritorijoje). Šiek tiek didesnis išorinės spinduliuotės lygis buvo pastebimas taip pat vakariniuose ir pietiniuose Lietuvos rajonuose.

Pagal duomenis apie ilgaamžių radionuklidų kiekį maisto produktuose (piene, mėsoje, žuvyje, miltiniuose produktuose, daržovėse ir kt.) buvo įvertintos ir vidinės apšvitos dozės, kurias sugėrė Lietuvos žmonės per pirmuosius dvejus metus po ČAE avarijos. Šiuos duomenis pailiustruosime 36 paveikslu, kuriame vaizduojama, kaip kito Lietuvoje maisto produktų radioaktyvumas pastaraisiais dešimtmečiais (matavimai atlikti Sveikatos apsaugos ministerijos Valstybiniame visuomenės sveikatos centre).

Atlikti skaičiavimai parodė, kad Lietuvos žmonių vidinė dozė, sugerta (daugiausia dėl radioaktyviųjų cezio izotopų) per pirmuosius dvejus metus po ČAE avarijos buvo ne didesnė kaip 0,5 mSv. Įvairiose Lietuvos vietose šios dozės nevienodos — didžiausios pietinėje ir vakarinėje dalyje.

Gauti duomenys (36 pav.) rodo, kad po ČAE avarijos vėlyvosios fazės metu vidinės sugertosios dozės dydžiai prilygsta foniniams dėl gamtinės kilmės radionuklidų, visų pirma ^{40}K, padaugėjimo maisto produktuose. Šis radioaktyvusis gamtinis kalio izotopas, skleidžiantis beta daleles ir

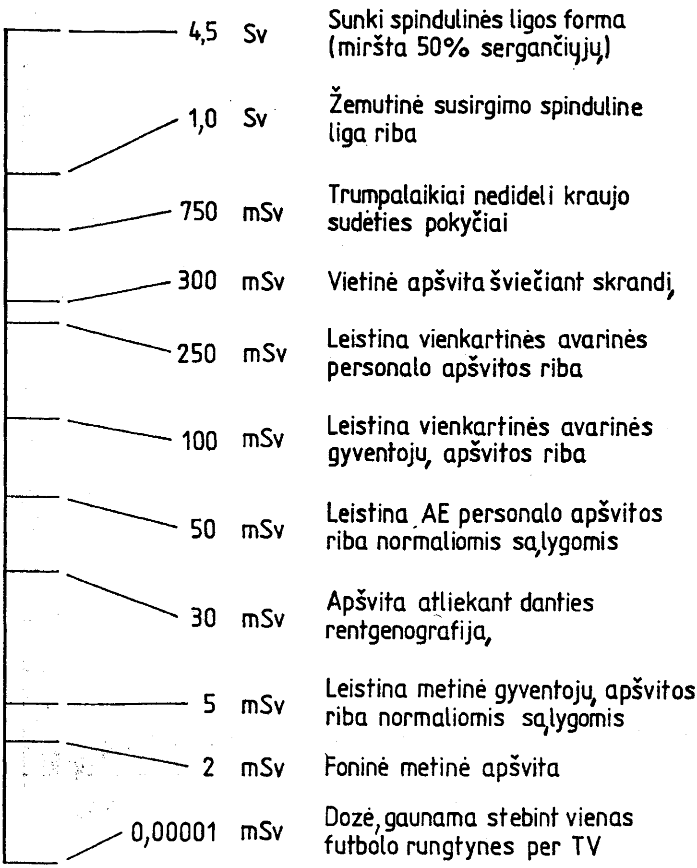




36 pav.
Maisto produktų (pieno, mėsos) taršos radioaktyviaisiais cezio ir stroncio izotopais kaita (matavimai atlikti Valstybiniame visuomenės sveikatos centre)

skvarbiuosius gama spindulius, su maistu patekęs į žmogaus organizmą, tolygiai pasiskirsto kūno raumenyse ir sąlygoja ne tik vidinę jonizuojančiosios spinduliuotės dozę (apie 0,2 Sv per metus), bet ir išorinę. Pateiksime tokį tikro angliško humoro pavyzdį. Didžiosios Britanijos branduolinės energetikos programos vadovas D. Hilas (D. Hill) įvertino, kokią išorinės jonizuojančiosios spinduliuotės dozę gauna vienas iš kito du sutuoktiniai, miegantys vienoje lovoje ir kartu švitinantys vienas kitą jų kūnuose esančio radioaktyviojo gamtinio kalio jonizuojančiaisiais spinduliais. Pasirodo, kad ši išorinė dozė siekia 0,01 mSv per metus.

Apibendrinanti informacija apie įvairaus dydžio jonizuojančiosios spinduliuotės dozių poveikį žmogui pateikiama 37 paveiksle. Reikėtų atkreipti dėmesį į dozių, gaunamų rentgeno diagnostikos metu, dydžius.



37 pav.
Jonizuojančiosios spinduliuotės dozių, sugeriamų įvairiomis sąlygomis, dydžiai ir jų galimo poveikio žmogui įvertinimas

Pabaiga

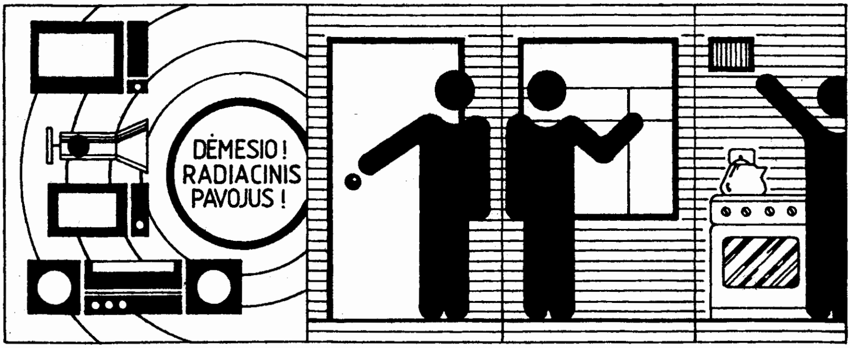
Lietuvos energetikos ministerijoje paruošta programa, kurioje įvertintos krašto energetikos reikmės ir vystymosi perspektyvos. Vystantis energetikai, numatytas ir svarus Ignalinos AE indėlis. Nemažai daroma, kad ji būtų eksploatuojama profesionaliai.

Kalbant apie branduolinės energetikos perspektyvas, reikia pabrėžti, kad išsivysčiusios šalys (Prancūzija, Japonija, JAV ir kt.) numato ir toliau plėtoti branduolinę energetiką. „Izvestijos" laikraščio korespondentas paklausė amerikietį dr. L. Uolesą (L. Walles), kodėl, jo nuomone, toks skirtingas požiūris į branduolinę energetiką JAV ir mūsų kraštuose. Jis atsakė: „Aš esu branduolinės energetikos šalininkas, ir tuo didesnis, kuo daugiau susipažįstu su šia sritimi. Jūsų visuomenės nerimas aiškintinas tuo, kad jos rimtai ir korektiškai neinformavo apie branduolinės energetikos problemas. JAV kiekvienas gali gauti visą jį dominančią informaciją apie bet kurį civilinės branduolinės energetikos objektą. Mūsų visuomenė nuolat lanko AE, ji operatyviai informuojama apie bet kurias, netgi mažai reikšmingas avarijas. Dėl to amerikiečiai tiki AE patikimumu ir tuo, kad jos būtinos jų gerovei. O pas jus buvo Černobylis, ir todėl visiškai suprantamas šiandieninis didelis nepasitikėjimas branduoline energetika. Man rodos, kad tokį požiūrį gali pakeisti tik gyventojams teikiama informacija visais branduolinės energetikos, technikos ir ekologijos klausimais."

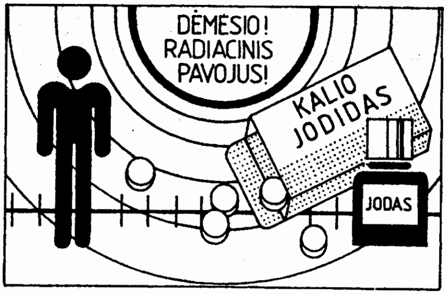
Dėl tos priežasties ir Lietuvoje (kraštas, kuriame yra viena galingiausių pasaulyje AE) dar mokyklos suole būtina ugdyti teisingą branduolinės energetikos vertinimą ir radiacinės apsaugos sampratą.

1 p r i e d a s

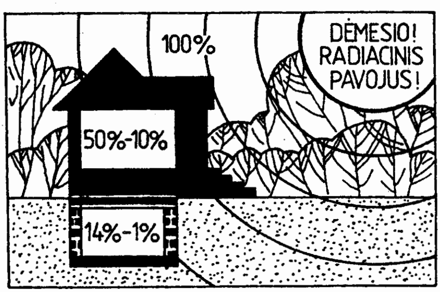
Trumpa bendroji radiacinės apsaugos instrukcija



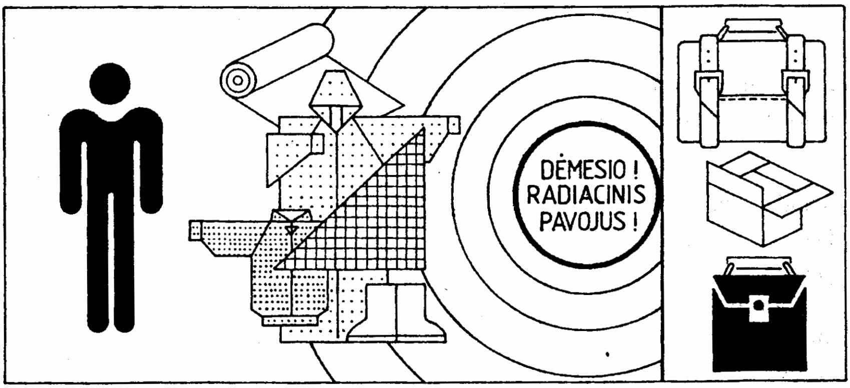
Apsaugos priemonių imkitės tik paskelbus apie AE avariją per radiją, televiziją ir kt. Visų pirma užsandarinkite buto langus, duris, ventiliacijos angas.



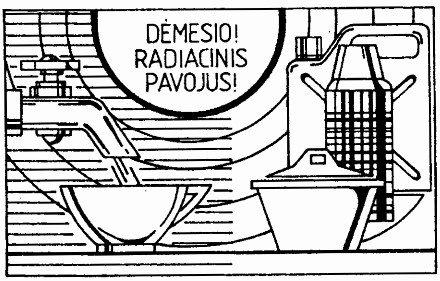
Rekomenduojama atlikti jodo profilaktiką tik tada, kai apie jos būtinumą bus paskelbta per informacijos priemones. Griežtai laikykitės stabilaus jodo preparatų vartojimo instrukcijų.



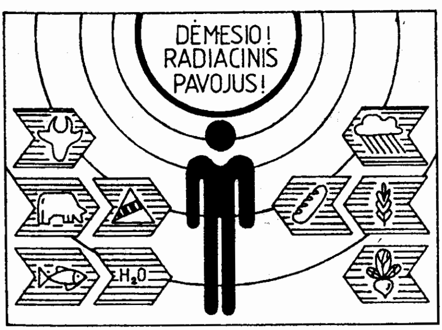
Namo arba rūsio sienos sugeria dalį jonizuojančiosios spinduliuotės (kaip parodyta paveiksle), todėl stenkitės kiek galima daugiau būti patalpose. Nevaikščiokite kelių pakraščiais, žole, neikite į mišką ar parkus.



Esant radiaciniam pavojui, atvirame ore būtina apsaugoti visas kūno dalis nuo galimo radionuklidų patekimo (polietilenas, skaros, lietpalčiai ir t. t.). Reikia ramiai pasiruošti galimai evakuacijai: susidėti dokumentus, pinigus, būtiniausius daiktus. Viską įpakuoti į lagaminus, dėžes ir įdėti į polietileno maišus arba plėvelę.



Paruošti vandens ir maisto atsargas hermetiškai užsidarančiuose induose ir pan.



Kategoriškai draudžiama vartoti maistui pieną gyvulių, kurie po avarijos ganėsi ganyklose; valgyti atvirame grunte augintas daržoves, kol jos nebus patikrintos; žuvį, po avarijos pagautą atviruose vandens telkiniuose. Patartina saugotis lietaus.

Jodo profilaktikos instrukcija įvykus avarijai atominėje elektrinėje

1. Jodo profilaktiką, t. y. skydliaukės sotinimą stabiliuoju jodu, kad ji negalėtų pasisavinti radioaktyviojo jodo, būtina pradėti kaip galima anksčiau, geriausia tuomet, kai yra paskelbiamas specialus Civilinės saugos departamento nurodymas per informacijos priemones (radiją, televiziją ir kt.).

Geriausiai skydliaukė apsaugoma, kai stabiliojo jodo preparatai vartojami prieš patenkant (įkvepiant arba su maistu) radioaktyviajam jodui į žmogaus organizmą.

Jodo profilaktikos veiksmingumas parodytas 1 lentelėje.

1 lentelė

Jodo profilaktikos poveikis skydliaukės apšvitos dozei priklausomai nuo stabiliojo jodo vartojimo laiko AE avarijų metu

Stabiliojo jodo preparato vartojimo laikas	Skydliaukės apšvitos dozės sumažėjimas (kartais)
6 val. iki radioaktyviųjų jodo izotopų įkvėpimo	100
Įkvėpimo momentu	90
Praėjus 2 val. po radioaktyviųjų jodo izotopų patekimo į žmogaus organizmą	10
Praėjus 6 val. po radioaktyviųjų jodo izotopų patekimo į žmogaus organizmą	2

2. Vienkartinė dozė suaugusiems — 130 mg kalio jodido (KI) arba 170 mg kalio jodato (KIO_3). Tai atitinka 100 mg grynojo jodo. Vaikams iki 3 metų amžiaus ir nėščioms moterims — perpus mažiau. Viena kalio jodido tabletė paprastai sveria 250 mg (vienam kartui suvartojama tik pusė tabletės), 125 mg arba 40 mg (skirta vaikams).

Šis jodo profilaktikos būdas (vartojant kalio jodido tabletes) yra įteisintas Lietuvos higienos norma.

Būtina prisiminti, kad kalio jodido tabletės šviesoje genda, todėl turi būti laikomos tamsaus stiklo tūbelėse arba tamsioje vietoje. Galiojimo laikas — 4 metai. Kalio jodatas išoriniam poveikiui gerokai atsparesnis.

Jei kalio jodido ar kalio jodato nėra, tuomet jis kartais pakeičiamas liugoliu.

Pasaulinės sveikatos apsaugos organizacijos rekomenduojamos stabiliojo jodo preparatų (kalio jodido ir kalio jodato) dozės įvairaus amžiaus gyventojų grupėms pateiktos 2 lentelėje. Šių dozių vartojimą jodo profilaktikai numatoma įteisinti Lietuvos higienos norma ateityje.

2 lentelė

Jodo preparatų dozės įvairaus amžiaus gyventojų grupėms

Amžiaus grupė	Jodo masė, mg	Kalio jodido masė, mg	Kalio jodato masė, mg
Kūdikiai iki 1 mėn.	12,5	15	20
Kūdikiai nuo 1 mėn. iki 3 m.	25	30—35	40—45
Vaikai nuo 3 m. iki 12 m.	50	65	85
Paaugliai, suaugusieji ir nėščios moterys	100	130	170

3. 100 mg jodo kiekis apsaugo žmogaus skydliaukę nuo radioaktyviųjų jodo izotopų 24 val. Tačiau, įvykus AE avarijai, radioaktyvieji jodo izotopai gali sklisti aplinkoje ne vieną, bet kelias dienas (Černobylio AE avarijos atveju — 10 dienų). Todėl, kad būtų palaikomas apsauginis stabiliojo jodo lygis žmogaus organizme, jodo preparatus galima vartoti ir ilgiau, bet

suaugusiems — ne ilgiau kaip 10 parų,
vaikams iki 3 metų ir nėščioms moterims — ne ilgiau kaip 2 paras.

Prireikus jodo profilaktiką taikyti ilgiau, būtina evakuoti atitinkamas gyventojų grupes, nes besaikis stabiliojo jodo vartojimas gali sukelti skydliaukės ligas.

4. Lietuvos higienos norma įteisinto jodo profilaktikos metodo pašalinis neigiamas poveikis retas. Tačiau minėtų jodo preparatų negalima vartoti, kai yra padidėjęs jautrumas jodui, sergant kai kuriomis kūno odos, skydliaukės ligomis (tireotoksikozė ir kt.) arba kai jodo preparatai jau buvo vartoti skydliaukės ligoms gydyti.

5. Respublikos sandėliuose yra pakankamai stabiliojo jodo preparatų (su vartojimo instrukcijomis), kurie paprastai dalijami žmonėms įvykus AE avarijai. Tačiau prisiminus, kad teigiamas stabiliojo jodo preparatų poveikis priklauso nuo jų patekimo į žmogaus organizmą laiko, galima rekomenduoti kiekvienai šeimai turėti šių preparatų savo vaistinėlėse, kad prireikus juos būtų galima greitai ir veiksmingai panaudoti.

3 priedas

Lentelės

I lentelė

Jonizuojančiosios spinduliuotės dozimetrijos dydžiai ir vienetai

Fizikinis dydis	Sisteminis vienetas	Nesisteminis vienetas	Vienetų sąryšis
Aktyvumas* (radioaktyvumas)	bekerelis [Bq]	kiuris [Ci]	1 Bq = 1 skil./s = $= 2{,}7 \cdot 10^{-11}$ Ci 1 Ci = $3{,}7 \cdot 10^{10}$ Bq
Sugertoji dozė	grėjus [Gy]	radas [rad]	1 Gy = 100 rad
Lygiavertė dozė	zyvertas [Sv]	remas [rem]	1 Sv = 100 rem
Ekspozicinė dozė	kulonas kilogramui [C/kg]	rentgenas** [R]	1 R = $2{,}56 \cdot 10^{-4}$ C/kg

* Kadangi šis leidinys skirtas platesniam skaitytojų ratui, tai, be fizikos terminijos komiteto patvirtintų terminų, tekste vartojami ir labiau suprantami jų sinonimai.

** Norint šį nesisteminį vienetą išreikšti sisteminiu ir atvirkščiai, verta prisiminti, kad beta ir gama spinduliams 1 Sv ≈ 100 R ir 1 mR/h ≈ $2{,}425 \cdot 10^{-2}$ Gy/s.

II lentelė

Radionuklidų, patekusių į aplinką, aktyvumas (× 10^{15} Bq) didžiausių branduolinių avarijų metu

Radionuklidas	Buvusi SSRS, Čeliabinsko sritis, Kaslis (1957 m.)	Anglija, Windscale (1957 m.)	JAV, Three Mile Island (1979 m.)	Buvusi SSRS, Černobylis (1986 m.)
^{90}Sr	2,0	0,00022	—	8
^{131}I	—	0,60	0,00055	260
^{132}Te	—	0,60	—	48
^{133}Xe	—	12	370	1700
^{134}Cs	—	0,0012	—	19
^{137}Cs	0,027	0,046	—	38
α spinduoliai	—	0,008	—	6

III lentelė

Vidutinė Lietuvoje rinktų ir atvežtinių baravykų tarša (matavimai atlikti Nacionalinėje veterinarijos laboratorijoje)

Metai ir rinkimo vieta	Savitasis aktyvumas, Bq/kg		
	^{90}Sr	^{137}Cs	^{134}Cs
1985, Lietuva	1,5 ± 0,15	1120±150	—
1986, Lietuva (po ČAE avarijos)	8,5 ± 1,3	3200 ± 800	1250 ± 300
1991, nežinoma vieta (džiovinti)	38,5 ± 3,5	217000 ± 20000	24 000 ± 2200

TRUMPAI APIE AUTORIUS

Vitalijus Ginzburgas (g. 1916 m.) — vienas žymiausių ir universaliausių fizikų teoretikų, daugelio mokslinių darbų, monografijų bei mokslo populiarinimo straipsnių autorius. Jo moksliniai interesai nepaprastai platūs — astrofizika, reliatyvumo teorija, plazmos fizika, elementariųjų dalelių fizika, mokslo istorija ir kt. Rusijos MA ir daugelio kitų šalių MA narys.

Stivenas V. Hokingas (Stephen W. Hawking, g. 1942) — žymus anglų fizikas teoretikas. Daugiau kaip dvidešimt metų sunkios ligos prikaustytas prie invalido vežimėlio, tačiau labai produktyviai dirba reliatyvumo teorijos, astrofizikos, matematinės fizikos srityse, yra nustatęs pagrindinius juodųjų bedugnių egzistavimo dėsnius. Be to, 1988 m. jis išleido mokslo populiarinimo bestselerį „Trumpa laiko istorija", kuris per keletą metų susilaukė daugiau kaip dvidešimt leidimų. Iš šios knygos ir paimtas rinkinyje pateikiamas straipsnis.

Bonifacas Vengalis g. 1951 m. Plungėje. Studijavo Vilniaus universitete puslaidininkių fiziką, mokėsi aspirantūroje Leningrade (dab. Sankt Peterburge). Apsigynęs kandidatinę disertaciją, grįžo į Puslaidininkių fizikos institutą. 1987 metų pavasarį įsitraukė į ką tik atrastų naujų superlaidžiųjų medžiagų tyrimus. Tęsdamas šiuos darbus, stažavosi Stokholmo karališkajame technologijos institute. Su Ukrainos fizikais parašė monografiją apie puslaidininkių fazinius virsmus, yra Aukštatemperatūrio superlaidumo laboratorijos vadovas.

Arūnas Krotkus g. 1948 m. Panevėžyje. Atėjo į fiziką per moksleivių olimpiadas. Pelnė premijas ne tik respublikinėje, bet ir sąjunginėje olimpiadoje, kur diplomą jam įteikė pats P. Kapica. Pagrindiniai darbai — iš puslaidininkių fizikos, optoelektronikos. Habilituotas gamtos mokslų daktaras, profesorius, laboratorijos vadovas, Lietuvos MA narys ekspertas.

Juozas Vidmantis Vaitkus g. 1941 m. Kalnaberžėje, mokytojų šeimoje. Mokėsi Vilniaus universitete, kur nuėjo kelią nuo laboranto ligi katedros vedėjo, profesoriaus, prorektoriaus ir Medžiagotyros ir taikomųjų mokslų instituto direktoriaus. Stažavosi ir skaitė paskaitas įvairiuose užsienio universitetuose. Tyrinėja puslaidininkių optines ir fotoelektrines savybes. Habilituotas gamtos mokslų daktaras, profesorius, Lietuvos MA narys korespondentas.

Romualdas Karazija g. 1942 m. Subačiuje. Baigęs Vilniaus universitetą, dirbo Fizikos ir matematikos, Fizikos bei Teorinės fizikos ir astronomijos institutuose. Pagrindiniai darbai iš atomo ir atomo spektrų teorijos. Dviejų monografijų ir šešių mokslo populiarinimo knygų autorius. Tarp pastarųjų: „Šimtas fizikos mįslių", „Linksmoji fizika", „Neregimųjų spindulių pėdsakais", „Kasdienės paslaptys" ir kt. Habilituotas gamtos mokslų daktaras.

Viktorija Gineitytė. Apgynusi diplominį darbą iš teorinės molekulinės fizikos VVU Fizikos fakultete, dirbo Chemijos fakultete, čia parengė kandidatinę disertaciją. Šiuo metu — vyresnioji mokslinė bendradarbė Teorinės fizikos ir astronomijos institute. Darbo kryptis — molekulių sandaros teorija. Gamtos mokslų daktarė.

Tatjana Nedveckaitė. Baigė Vilniaus universiteto Fizikos fakultetą. Dar būdama 2-ojo kurso studentė pradėjo dirbti Fizikos ir matematikos instituto Radiologinėje laboratorijoje. Kandidatinė disertacija buvo skirta radioaktyviųjų izotopų tyrimams. Po Černobylio atominės elektrinės avarijos pradėjo kartu su medikais nagrinėti avarijos poveikį Lietuvos žmonių, ypač vaikų, sveikatai. Gamtos mokslų daktarė, Fizikos instituto Radiacinės apsaugos laboratorijos vadovė.

„FIZIKOS MOKYKLOS" SERIJOS LEIDINIŲ SARAŠAS

1. A. K i t a i g o r o d s k i s. Fizika — mano profesija. V.: Mintis, 1973.
2. B. F o m i n a s. Nuo kibirkšties ligi lazerio. V.: Mintis, 1974.
3. R. F e i n m a n a s. Apie fizikos dėsnius. V.: Mintis, 1974.
4. K. D j u r e l a s. Reliatyvumo teorijos abėcėlė. V.: Mintis, 1975.
5. Kas domina fizikus šiandien? V.: Mintis, 1975.
6. L. P o n o m a r i o v a s. Anapus kvanto. V.: Mokslas, 1977.
7. K. K o n s t a n t i n a v i č i u s. Gyvybės fizika, arba nuo atomo ligi ląstelės. V.: Mokslas, 1978.
8. R. K a r a z i j a. Neregimųjų spindulių pėdsakais. V.: Mokslas, 1983.
9. V. K a r c e v a s. Didžiųjų lygčių nuotykiai. V.: Mokslas, 1983.
10. Kas domina fizikus šiandien? V.: Mokslas, 1984.
11. A. M a t u l i s. Kaip mes matome. V.: Mokslas, 1985.
12. R. B a l t r a m i e j ū n a s. Lazeriai ir jų profesijos. V.: Mokslas, 1986.
13. V. Š e l e s t a s. Skeveldros. V.: Mokslas, 1987.
14. S. C h i l k e v i č i u s. Fizika aplink mus. V.: Mokslas, 1988.
15. A. A ž u s i e n i s. Tarpžvaigždinės medžiagos fizika. V.: Mokslas, 1989.
16. K. V a l a c k a. Puslaidininkiai. V.: Mokslas, 1990.